Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00021

Received date : 11 January, 2021

Accepted date : 8 June, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 16 June, 2021

ノズルからの空気吹出しと吸込みによるシートフラッタのアクティブ制振

高橋 輝^{*1}, 河原 聖^{*1}, 武田 真和^{*2}, 廣明 慶一^{*2}, 渡辺 昌宏^{*2}

Active control of sheet flutter by using injection and suction air flows from a nozzle

Hikaru TAKAHASHI^{*1}, Satoru KAWAHARA^{*1}, Masakazu TAKEDA^{*2}, Keiichi HIROAKI^{*2}
and Masahiro WATANABE^{*2}

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

^{*2}Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University
5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa 252-5258, Japan

Abstract

This paper presents a novel technique of an active control to suppress sheet flutter. In this technique, sheet flutter is actively and non-contactly suppressed by injection and suction air flows through a nozzle. A nozzle is combined with a speaker as an actuator, and this device is drove in a sheet displacement feedback system. PET sheet is used as a controlled object, and the sheet is supported upper end in a wind tunnel. To show the effectiveness of this technique for sheet flutter suppression, the suppression characteristics are experimentally examined. Then, the suppression effectiveness is evaluated at the increased rate of the flutter velocity with control as compared to it without control. Moreover, air flow patterns around the nozzle and the sheet during control are visualized by the smoke wire method. Lastly, the control effects by injection and suction air flows to the sheet are examined in terms of air flow patterns, frequency response characteristics, and unsteady pressure. As a result, this paper shows the effectiveness of the proposed device and technique for sheet flutter suppression, and the flutter velocity is increased by 50 % with control as compared to without control. In this technique, the injection and suction air flows from the nozzle change the airflow around the sheet, not directly apply momentum on the sheet. Therefore, this technique is an air flow control.

Keywords : Sheet flutter, Flow induced vibration, Suppression device, Air flow control

1. はじめに

印刷機械やフィルム製造機械では、印刷紙やフィルムなど（以下、シートと呼ぶ）に対して塗装や乾燥、高速搬送を行う工程が多くある。これら一連のハンドリング過程では、機械的要因やシート周りの気流によってシートに振動が発生し、さらに、その振動に起因して非定常流体力が発生する。そして、シートの振動と非定常流体力がある特定の条件下で連成してしまうことで振動が助長されることがある。この振動現象は、気流により励起される自励振動の一種であり、フラッタと呼ばれる。一般に、薄く柔軟なシートは、構造減衰が小さいためフラッタが発生しやすい系である。シートの生産現場ではフラッタの発生が報告されており、シートの品質不良や生産性の低下を招いている（渡部他, 1994）。そのため、シートフラッタの発生を抑止することは品質管理の点で重要である。

これまでに、シートフラッタの振動特性や発生条件は多くの研究者によって調べられてきた（山口他, 1999; Watanabe et al., 2002; 金子, 呉, 2002; 呉, 金子, 2003; Tang et al., 2007, 2008, 2009; 渡辺他, 2016）。一方、フラッタの

No.21-00021 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00021]

^{*1} 学生員, 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 of corresponding author: watanabe@me.aoyama.ac.jp

制振手法に関する研究報告は少ない。そして、その多くが翼や梁に発生するフラッタを制振対象としている（西原, 金子, 1994a, 1994b; 菊池他, 1995; 利光他, 2003, 2004; Han et al., 2006; Huang, 1987）。例えば、西原らは、すきま流路内に弾性支持された平板を制振対象に、制振対象の上流端に設置した圧電素子（PZT）を駆動させるアクティブ制振手法を提案し、その制振特性を調べた。また、利光らや Huang は一様流中に設置された翼モデルを制振対象に、スピーカからの音波を利用したアクティブ制振手法を提案し、その制振特性を調べた。アクティブ制御手法は、系の安定化に有効な手法の 1 つであり（Williams and Huang, 1989）、上述の研究報告からも、フラッタの抑止に有効である可能性が示された。しかしながら、シートなどの薄い柔軟媒体に発生するフラッタを制振対象とした研究は報告されていない。

上記の例の一つに挙げた制振手法では、制振対象に直接アクチュエータを取り付けている。しかしながら、シートの製造ラインでは、製品となるシートに直接アクチュエータやダンパなどを取り付ける制振手法を用いることはできない。また、インク塗布後や機能性付加後のシートへの接触による減衰付加は、更なるシートの品質不良を招く可能性がある。そのため、シートを制振対象とする場合、非接触の制振手法が適切である。

さらに、実機では、生産性向上のために乾燥工程の空気吹き付け速度やシートの搬送速度の向上も同時に求められている。しかしながら、シート周りの気流が高流速になるほどシートにフラッタが発生しやすいため、これらの速度条件には制限が設けられている。ここで、高流速中で発生するフラッタを抑止することができれば、空気吹き付け速度や搬送速度の上限を引き上げることができ、製造ラインの生産性の向上を図ることができる。

そこで、本研究では、薄く柔軟なシートに発生するフラッタの非接触制振手法および制振デバイスを新たに提案した。本制振手法は、空気の吹出しと吸込みをフラッタ発生時のシート近くで行うことで、シートに接触することなくフラッタを制振し、フラッタの発生を抑止する手法である。ノズルから空気吹出しと吸込みを行う機構を提案し、制振デバイスを製作した。このデバイスとシートを用いた風洞実験により、本制振手法のシートフラッタに対する有効性を示した。そして、高流速中で発生するフラッタの抑止を目標として制振効果を定量的に評価し、デバイスの設置条件が制振効果に及ぼす影響を調べた。最後に、デバイス駆動時のシート周りの流れ場、シートの周波数応答特性、シート表面上の圧力変動を調べることで、ノズルからの空気吹出しと吸込みがシート周りの流れおよびシートに与える制御効果を明らかにし、制振メカニズムを考察した。

2. 実験装置

2・1 テストセクションと制振デバイス

本研究では、提案した制振手法および制振デバイスの基本的な制振特性を風洞実験により調べた。実験では、特性が明らかにされている体系である、片持ち支持されたシートに発生するフラッタを制振対象とした。この体系は、実機のシート端部処理工程において、シート裁断後、ダクトへの吸込み回収の体系を模擬しており、そこで発生するシートフラッタを制振対象としている。図 1 に、実験装置全体の写真と概略図を示す。表 1 に、本研究で使用したシートのパラメータを示す。風洞実験は、縦型回流式風洞を用いて行った。シートの上端を 2 枚の支持板（厚さ約 1 mm）で挟み、風洞のテストセクション内上部に固定した。2 枚の支持板はシート周りの流れを乱さないように流線形状に加工した。シートの振動変位をレーザ変位計で測定し、測定点を振幅が大きいシート下流端から 15 mm の中心位置とした。制振デバイスをシート変位の測定側とは反対側に設置して実験を行った。

空気吹出しと吸込みを行う制振デバイスをノズルとスピーカを組み合わせで製作した。このデバイスは、スピーカを駆動することでダイアフラム（スピーカ膜面）が振動し、ノズルを通して空気吹出しと吸込みを交互に行う。この空気の吹出しと吸込みをシート周りに作用させることでシートフラッタの非接触制振を行う（図 1(b)）。また、デバイスの設置角度、設置高さ、シートまでの距離をデバイスの支持機構によって変更することができる。

図 2 に、主な寸法を示したシートおよびデバイスとその構成要素の写真を示す。スピーカはノズルを通して圧縮空気を十分に吹出すことのできるものを選定した（VISATON 社製 WS 20E 8 OHM）。ノズルは 3D プリンターで製作した。ノズル内の流動抵抗を小さくするために、絞り部が曲線状となるように設計し、仕上がり面が滑らかになるように積層した。

(a) Photograph of the test section

(b) Schematic illustration of the test section

Fig. 1 Photograph and schematic illustration of the test section. PET sheet, as a controlled object, is clamped at upper end and fixed in the wind tunnel. The sheet displacement is measured by a laser displacement sensor and the suppression device is arranged in the opposite side of the sensor. The suppression device mainly consists of a speaker and a nozzle. The speaker diaphragm vibrates by driving the speaker, then injection and suction air flows are alternately formed through the nozzle.

Table 1 Parameters of the sheet.

Material	PET
Length L [mm]	200
Width [mm]	50
Thickness [mm]	0.3

(a) PET sheet

(b) Suppression device

(c) Speaker

(d) Nozzle

Fig. 2 Photograph of the sheet, device and its main components.

2・2 アクティブ制御システム

図3に、本研究で使用した制御システムの制御信号の流れを示す。システムはセンサ部、コントローラ部およびアクチュエータ部で構成されるフィードバック制御システムである。センサ部では、シートの振動変位の測定とフィルタ処理による高周波成分およびノイズの除去を行う。コントローラ部（PC）では、制御パラメータの設定および変更を行う。アクチュエータ部では、スピーカアンプで制御信号を増幅し、制振デバイスを駆動する。

制御はPD制御則に基づいて行った。フィードバック制御では、制御信号の位相進みおよび位相遅れがシステムの安定性に特に重要なパラメータとなる。通常、PD制御では比例ゲイン K_p と微分ゲイン K_d が制御パラメータであり、これらのパラメータを用いて系の安定化の観点から制御効果を議論することは難しい。そこで、本研究では、コントローラにおいて制御ゲイン G_c [V/V] と制御位相 ϕ_c [deg.] を制御パラメータとして定義し、フラッタ振動数に対してコントローラから出力する制御信号の大きさと位相を変化させて制御効果を調べた。

Fig. 3 Diagram and signal flow of the active feedback control system. In the sensor section, the sheet displacement is measured by a laser displacement sensor, and noises are removed through a filter. In the controller section, PD parameters of this control loop is tuned. In the actuator section, the D/A converted signal is amplified by a speaker amplifier and the suppression device is drove.

以下、この2つの制御パラメータについて説明する．図4に、コントローラ部における電圧信号の入出力関係を示した図を示す．制御ゲイン G_c [V/V] と制御位相 ϕ_c [deg.] は、コントローラに入力されるシート変位の電圧信号に対して、コントローラからデバイス（スピーカ）に出力する制御電圧信号の増幅倍率と位相差を決めることができるパラメータである．つまり、これらのパラメータを変えることで、シートの振動に対して、空気吹出し・吸込みの流速と位相差を任意に決めることができる．以下に、制御ゲイン G_c [V/V]、制御位相 ϕ_c [deg.] と比例ゲイン K_p 、微分ゲイン K_d の関係式を示す．コントローラに入力されるシートの変位信号を $a(t)$ とすると、コントローラから出力する制御信号 $u(t)$ はPD制御則に基づいて以下の式(1)で表すことができる．

$$u(t) = K_p a(t) + K_d \frac{d}{dt} a(t) \quad (1)$$

ここで、シートの変位信号 $a(t)$ を、振幅 A [V]、角振動数 ω [rad/s] の調和振動とすると、式(1)は、以下の式(2)のように整理できる．

$$u(t) = A_o \sin(\omega t + \phi_o), \quad A_o = \sqrt{(K_p A)^2 + (K_d A \omega)^2}, \quad \phi_o = \tan^{-1}(K_d \omega / K_p) \quad (2)$$

そして、制御ゲイン G_c [V/V] と制御位相 ϕ_c [deg.] を以下の式(3)のように定義した．

$$G_c = A_o / A = \sqrt{(K_p)^2 + (K_d \omega)^2}, \quad \phi_c = \phi_o = \tan^{-1}(K_d \omega / K_p), \quad \omega = 2\pi f \quad (3)$$

式(3)より、制振対象であるシートのフラッタ振動数 f_f [Hz] を式中の f に与えることで、任意の G_c [V/V] と ϕ_c [deg.] に対して K_p と K_d が一意に定まる．本研究では、事前にシートにフラッタを発生させて、フラッタ振動数を調べた（次章で後述する）．ここで、実機においては、シート生産ラインの稼働前に、蛇行や振動状態を確認するパラメータ調整期間があり、フラッタが発生する場合には、この調整期間にフラッタ振動数を調べることができる．事前に調べたフラッタ振動数を使用することで、本制御システムを実機で発生するフラッタの制振に適用することが可能となる．

また、図3、図4において、各構成部における入出力関係（ゲインと位相差）を求めることで、シートの振動変位からノズルからの空気吹出し流速までの入出力関係を以下の式(4)と式(5)から求めることができる．

$$G \text{ [(m/s)/mm]} = G_s \text{ [V/mm]} \times G_c \text{ [V/V]} \times G_a \text{ [(m/s)/V]} \quad (4)$$

$$\phi \text{ [deg.]} = \phi_s \text{ [deg.]} + \phi_c \text{ [deg.]} + \phi_a \text{ [deg.]} \quad (5)$$

ここで、下付き添え字の s , c , a はそれぞれ、センサ部、コントローラ部、アクチュエータ部の値を表す。表 2 と表 3 に、各構成部におけるゲインと位相差の値を示す。ここで、センサ部、アクチュエータ部の値は、後述するシートのフラッタ振動数 f_f ($= 9.5$ Hz) を基準にしてフィルタとスピーカの周波数特性により決定した値であり、コントローラ部のカッコ内の値は本研究の実験時に与えた制御パラメータ値である。

Fig. 4 Diagram and signal flow in the controller section. The proportional gain K_p and the differential gain K_d of the PD control are determined according to the sheet displacement output from the sensor. The controller calculates K_p , K_d based on a relational expression of the controller gain G_c [V/V] and the controller phase ϕ_c [deg.].

Table 2 Parameters of the control gain.

Sensor gain G_s [V/mm] (= Constant)	0.089			
Controller gain G_c [V/V] (= Parameter)	(0.1)	(0.4)	(0.7)	(1.0)
Actuator gain G_a [(m/s)/V] (= Constant)	0.289			
Total gain G [(m/s)/mm] ($= G_s \times G_c \times G_a \times 10^{-2}$)	0.26	1.0	1.8	2.6

Table 3 Parameters of the control phase.

Sensor phase ϕ_s [deg.] (= Constant)	130
Controller phase ϕ_c [deg.] (= Parameter)	(-180 ~ 180)
Actuator phase ϕ_a [deg.] (= Constant)	75
Total phase ϕ [deg.] ($= \phi_s + \phi_c + \phi_a$)	$205 + \phi_c$

3. フラッタ制振実験

3・1 フラッタ特性

フラッタ制振実験を行う前に、本研究で使用したシートの基本的なフラッタ特性を調べた。図 5 に、流速増加に伴うシートの振動振幅の変化とフラッタ発生時の振動数の変化を調べた結果を示す。図 5(a)より、 $U = 8.2$ m/s を超えると急激にシートの振動振幅が大きくなり、シートにフラッタが発生する。図 5(b)より、フラッタ発生時のシートの振動数はほぼ一定である。また、図 6 に、フラッタ発生時のシートの振動を FFT 解析した結果を示す。図より、振動は約 9.5 Hz の振動が卓越している。

そこで、前章で述べた、制御システムの各構成部におけるゲインと位相差を、フラッタ振動数 $f_f = 9.5$ Hz に基づいて定め（前章、表 2、表 3）、フラッタ制振実験を行った。

Fig. 5 The amplitude change (a) and the flutter frequency during fluttering (b) when the flow velocity is increased. The amplitude is sharply increased after $U = 8.2$ m/s, and the flutter frequency is approximately 9 ~ 10 Hz.

Fig. 6 FFT results of the flutter vibration in the case of $U = 8.6$ m/s. The dominant frequency of the sheet is 9.5 Hz.

3・2 実験方法

フラッタ制振実験では、制振デバイスの設置条件を変えてフラッタの制振特性を調べた。図7に、制振デバイスの設置パラメータを定義した図を示す。設置パラメータを、ノズルを向ける目標位置 H 、デバイスの設置距離 D 、デバイスの設置角度 θ の3つとし、以下のように定義した。目標位置 H を、シート下流端からの高さで定義し、シート上のこの位置に向けて空気吹出しと吸込みを行った。設置距離 D を、ノズル出口からノズルを向ける目標位置までの距離で定義した。設置角度 θ を、ノズルを向ける目標位置から上下方向に測った角度で定義した。ここで、目標位置 H と設置距離 D をシート長 L で無次元化した。シートの振動変位の測定点は、デバイスの設置条件によらずシート下流端から 15 mm の中心位置に固定した。

実験はこれらの設置パラメータを変化させて以下の実験①、実験②、実験③を行った。図8に、それぞれの実験における制振デバイスの配置図を示す。実験①では、 $\theta = 0^\circ$ 、 $H/L = 0.5$ に固定した条件のもと、設置距離 D を変更して実験を行った (図7(b))。実験②では $D/L = 0.375$ 、 $H/L = 0.5$ に固定した条件のもと、設置角度 θ を変更して実験を行った (図7(c))。実験③では $D/L = 0.375$ 、 $\theta = 0^\circ$ に固定した条件のもと、目標位置 H を変更して実験を行った (図7(d))。

Fig. 7 The definition of the arrangement parameters. The nozzle is directed to the target position H that is defined by a height from the lower end of the sheet. The installation distance D is defined by a distance between the nozzle tip and the target position. The installation angle θ is defined by a vertically angle based on the target position.

Fig. 8 Device arrangements of the experiments. In the experiment ① : fixed $\theta = 0^\circ$, $H/L = 0.5$ and changed D [mm]. In the experiment ② : fixed $D/L = 0.375$, $H/L = 0.5$ and changed θ [°]. In the experiment ③ : fixed $D/L = 0.375$, $\theta = 0^\circ$ and changed H/L .

実験①～③では、制振効果が得られる制御位相とフラッタが発生する流速（以下、フラッタ流速と呼ぶ）を調べた。実験を以下の2つの手順で行った。

まず、デバイスを設置した状態で、風洞の空気流速 U を非制御時のフラッタ流速 U_f より高い流速に設定し、シートにフラッタを発生させた。ここでは、流速を $U = 1.05U_f$ に設定した。そして、制御位相を変化させて制御を行い、フラッタが制振されるかどうかを調べた。

次に、非制御時と制御時に空気流速 U を徐々に増加させ、シートの振動変位をそれぞれ測定してフラッタ流速を調べた。ここで、フラッタが発生する流速付近では、シート表面を小さく打撃して擾乱を与え、振動が成長するか減衰するかを確認してから測定を行った。表4に、実験パラメータを示す。設置距離と目標位置に関しては、参考としてカッコ内に有次元の値を示す。

Table 4 Parameters of the experiment.

Normalized installation distance D/L (Installation distance D [mm])	0.275, 0.375, 0.475, 0.575 (55, 75, 95, 115)
Installation angle θ [°]	-30 ~ 30
Normalized target position H/L (Target position H [mm])	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 (0, 50, 100, 150, 200)
Controller gain G_c [V/V]	0.1, 0.4, 0.7, 1.0
Controller phase ϕ_c [deg.]	-180 ~ 180

3・3 代表的なフラッタ制振特性と制振効果の評価基準

図9～図12に、 $D/L = 0.375$, $\theta = 0^\circ$, $H/L = 0.5$ でデバイスを設置した場合の、代表的なフラッタ制振特性を調べた結果を示す。ここで、 $D/L = 0.375$, $\theta = 0^\circ$, $H/L = 0.5$ は、実験①～③で共通するデバイスの設置条件である。図9(a)は、制振効果が得られる制御位相の範囲を調べた結果である。このグラフは横軸が制御位相 ϕ_c [deg.]、縦軸が非制御時のシートの振動振幅 z_n [mm] に対する制御時の振動振幅 z_c [mm] の比である。この振幅比が1より小さい場合、フラッタを制振できる制御位相であることを表す。制御により励振してしまう（振幅比が1を超える）場合は、デバイスに過大な負荷がかかってしまうため、振動の測定を行わなかった。

図9(b)は、非制御時と代表的な制御時のフラッタ流速を調べた結果である。制御時のフラッタ流速は、前述の結果（図9(a)）より、特に振動振幅を抑止できる代表的な制御位相を用いて調べた結果である。図より、制御時には、フラッタによる振動振幅の増加が、非制御時よりも高流速側で起こっていることがわかる。

本研究では、制御によるフラッタ流速の増加率に対して制振効果を評価した。まず、フラッタ流速を定量的に定義するため、振動振幅の大きさに基準を設けた。基準をシート長 $L (= 200)$ [mm] に対する振動振幅 $\bar{z}$ [mm] の比率で定義し、比率の異なる 3 つの基準を定めた。表 5 に、3 つの基準と比率の対応関係を示す。シート長の 1.5 % の振動振幅をレベル A、2.5 % をレベル B、5.0 % をレベル C とし、これらの基準に達した流速をフラッタ流速と定義した。そして、各基準で非制御時に対する制御時のフラッタ流速の増加率を算出し、制振効果をレベル A, B, C の三段階の基準で評価した。

図 9(b) 中には、レベル A, B, C のラインをそれぞれ ---, ---, --- で示している。図より、レベル A、レベル B、レベル C の基準で定義したフラッタ流速が、制御によりそれぞれ約 13 %, 20 %, 32 % 増加することがわかる。

実験①～③で制振デバイスの設置条件を変更すると、ノズルから吹出された空気シートまでの到達時間や到達箇所が変化するため、制振効果が得られる制御位相が変化すると考えられる。また、非制御時であってもシート周りの流れが僅かに変化する。そのため実験①～③では、設置条件を変更するたびに、制振効果が得られる制御位相、および非制御時と制御時のフラッタ流速を調べ、制振効果を評価した。

Fig. 9 The ratio of the amplitude of the sheet in changing control phase ϕ_c [deg.] at $U = 1.05U_f$ ($U_f = 8.7$ m/s) (a) and the normalized amplitude in changing flow velocity U [m/s] (b) in the case of $D/L = 0.375$, $\theta = 0^\circ$, and $H/L = 0.5$ with control $G_c = 0.7$.

Table 5 Correspondence table of the line levels.

($L = 200$ mm)	Rate ($\bar{z}/L \times 100$ [%])
Level A ---	1.5 %
Level B ---	2.5 %
Level C ---	5.0 %

図 10 に、制御時のシートの振動変位とスピーカに印加される制御電圧の時刻歴波形を示す。図より、制御開始直後、素早くフラッタが制振されていることがわかる。そして、制御を止めると再びフラッタが発生し、振動が成長する。このことから、本制振手法は、シートフラッタに対して有効であることがわかる。

また、図 11 と図 12 に、制御ゲインを変えた場合の制振特性を調べた結果を示す。図 11 は、制御開始直後のシートの振動変位とスピーカに印加される制御電圧の時刻歴波形である。図より、制御ゲインが小さい場合、フラッタをほとんど抑止できないが、制御ゲインを大きくすることで、素早くフラッタを制振できることがわかる。しかしながら、制御ゲインを大きくし過ぎると、スピーカにかかる負荷も大きくなるため、後述する実験①～③では、制御ゲイン $G_c = 0.7$ を用いて実験を行った。

図 12 は、非制御時のフラッタ発生時のシートの振動と制御時のシートの振動を FFT 解析した結果である．図より、制御を行うことで、フラッタ振動数成分 ($f_f=9.5$ Hz) の振動を低減すると同時に、広い周波数帯域の振動も抑止できることがわかる．また、制御時の卓越振動数は、非制御時の卓越振動数（フラッタ振動数）よりも低下することがわかる．この理由は、制御により、シート振動と流体力の連成に起因した、流体付加剛性の影響が小さくなったためである．

Fig. 10 Time histories of sheet displacement (a) and control voltage (b) in the case of $D/L = 0.375$, $\theta = 0^\circ$, $H/L = 0.5$ and $U = 1.05U_f$ ($U_f = 8.7$ m/s) with control $G_c = 0.7$ and $\phi_c = 140$ deg.. Soon after the control is turned on, flutter is suppressed immediately. When the control is turned off, flutter occurs again.

Fig. 11 Continues to the next page. →

Fig. 11 Time histories of sheet displacement and control voltage right after starting control with $\phi_c = 140$ deg. in the case of $D/L = 0.375$, $\theta = 0^\circ$, $H/L = 0.5$ and $U = 1.05U_f$ ($U_f = 8.7$ m/s). The flutter is not suppressed enough by the control with a small controller gain. The suppression device drove with a larger controller gain suppresses flutter enough and immediately, however, a high voltage is applied on the speaker during large vibration.

Fig. 12 FFT results of the sheet vibration with control $\phi_c = 140$ deg. and without control in the case of $D/L = 0.375$, $\theta = 0^\circ$, $H/L = 0.5$ and $U = 1.05U_f$ ($U_f = 8.7$ m/s). The dominant frequency is slightly moved a low frequency side by the control. The vibration of the sheet over a wide frequency is suppressed by the control with a larger controller gain.

3・4 設置距離が制振特性に及ぼす影響

図 13 に、デバイスの設置距離を変えた実験①において、非制御時と代表的な制御時のフラッタ流速を調べた結果を示す。図 13(a) は、流速増加に伴う振動振幅の変化を示したグラフである。図 13(b) は、デバイスのシートまでの設置距離ごとに、非制御時に対する制御時のフラッタ流速の増加率をまとめた棒グラフである。

これらの結果より、設置距離が遠い ($D/L = 0.475, 0.575$) 場合は、設置距離が近い ($D/L = 0.275, 0.375$) 場合と比較して増加率が小さく、フラッタ流速がほとんど増加しない。また、距離が近い $D/L = 0.275$ と $D/L = 0.375$ の結果を比較すると、増加率に顕著な違いは見られない。つまり、制振効果を得るには、ノズル出口とシートまでの距離をある程度近づける必要がある。ただし、近づけすぎてしまうとノズルとシートが接触してしまう恐れがあるため、適切な設置距離が必要である。

Fig. 13 The amplitude change when the flow velocity is increased (a) and the increased rate of flutter velocity with control as compared to it without control (b) in the experiment ①. These graphs indicate that the flutter velocity is not much increased with control in the case that the distance between the sheet and the device is far.

3・5 設置角度が制振特性に及ぼす影響

図 14 に、デバイスの設置角度を変えた実験②において、非制御時と代表的な制御時のフラッタ流速を調べた結果を示す。図 14(a) は、流速増加に伴うシートの振動振幅の変化を示したグラフである。図 14(b) は、設置角度ごとに、非制御時に対する制御時のフラッタ流速の増加率をまとめた棒グラフである。

これらの結果より、ノズルを上流側から目標位置に向ける場合 ($\theta = 10^\circ \sim 30^\circ$) よりも、下流側から目標位置に

向けた場合 ($\theta = -30^\circ \sim -10^\circ$) に増加率が大きい。特に、ノズルを少し下流側から目標位置に向けた $\theta = -10^\circ$ の場合に、レベル A, B で評価した増加率が大きい。設置角度を $\theta = -10^\circ$ から $\theta = -20^\circ, -30^\circ$ と大きくした場合、増加率が $\theta = -10^\circ$ の場合よりも徐々に低下する。また、 $\theta = 0^\circ, 10^\circ$ の場合、流速の増加に伴ってシートの振動振幅がなだらかに大きくなる (図 14 (a4), (a5))。そして、 $\theta = 20^\circ, 30^\circ$ では、フラッタ流速がほとんど増加しない。設置角度によりこれらの制振特性が変化する理由は、ノズルからの空気流れとシート周りの空気流れの相互作用で生じる流れの変化に起因すると考えられ、空気流れの可視化結果に関連付けて 4・1 節で考察する。

(a) Amplitude change when the flow velocity is increased.

Fig. 14 Continues to the next page. →

Fig. 14 The amplitude change when the flow velocity is increased (a) and the increased rate of flutter velocity with control as compared to it without control (b) in the experiment ②. These graphs indicate that the increased rate in the case of directing the nozzle tip to upstream from downstream ($\theta = -30^\circ \sim -10^\circ$) is higher than that in the case of directing the nozzle tip to downstream from upstream ($\theta = 10^\circ \sim 30^\circ$). However, even if the angle is set to be larger from downstream to upstream, the increased rate gets to decrease. Therefore, setting the device with slight angles from downstream to upstream ($\theta = -10^\circ$) is effective for the sheet flutter.

3・6 目標位置が制振特性に及ぼす影響

図 15 に、ノズルを向ける目標位置を変えた実験③において、非制御時と代表的な制御時のフラッタ流速を調べた結果を示す。図 15(a) は、流速増加に伴うシートの振動振幅の変化を示したグラフである。図 15(b) は、目標位置ごとに、非制御時に対する制御時のフラッタ流速の増加率をまとめた棒グラフである。

これらの結果より、目標位置をシート先端に設定した場合 ($H/L=0$)、制御によりフラッタ流速がほとんど増加せず、制振効果が得られないことがわかる。そして、目標位置を上流側へ高くするにつれて、増加率が大きくなる傾向が見られ、シート中央よりも少し上流側の $H/L=0.75$ を目標位置に設定した場合に、特に増加率が大きい。しかしながら、目標位置をシート上流端に設定した場合 ($H/L=1$) では、非制御時のフラッタ流速以下の流速で、非制御時の振動振幅よりも制御時の振動振幅が大きくなり (図 15(a5))、制振効果が得られない。また、目標位置 H/L を変えたとき、目標位置がシート中央より上流位置の場合では ($H/L=0.5 \sim 1$)、制振に効果的な制御位相が変化することがわかる。目標位置によりこれらの制振特性が変化する理由は、制御効果を受けるシート領域の変化に起因すると考えられ、空気流れの可視化結果に関連付けて 4・1 節で考察する。

Fig. 15 Continues to the next page. →

Fig. 15 The amplitude change when the flow velocity is increased (a) and the increased rate of flutter velocity with control as compared to it without control (b) in the experiment ③. These graphs indicate that the increased rate gets to increase as the device set to upper stream side, and setting device with heights at a little upper side of the sheet central part ($H/L = 0.75$) is effective for the sheet flutter. However, in the case of setting the device with height at sheet hold part ($H/L = 1$), a minute vibration is excited and the flutter velocity dose not increase with control.

3・7 大きい制振効果が得られるデバイスの設置条件

前述の実験①の結果より、ノズル出口と目標位置までの距離が遠い場合、ほとんど制振効果が得られないため、制振効果を得るには、距離を近づける ($D/L = 0.275, 0.375$) 必要があることがわかった。実験②の結果より、デバイスを水平に設置するよりも、ノズルが下流側から目標位置に向くように設置 ($\theta = -30^\circ \sim -10^\circ$) することで制振効果が向上することがわかった。そして、実験③の結果より、ノズルを向ける目標位置をシート中央より少し上流側に設定 ($H/L = 0.75$) することで、大きい制振効果が得られることがわかった。そこで、上述した制振効果が得られる設置パラメータを組み合わせ、 $D/L = 0.375, \theta = -30^\circ \sim 0^\circ, H/L = 0.75$ の条件でデバイスを設置した場合の制振効果を調べた。

図 16 に、非制御時と制御時のフラッタ流速を調べた結果を示す。図 16(a) は、流速増加に伴うシートの振動振幅の変化を示したグラフである。図 16(b) は、非制御時に対する制御時のフラッタ流速の増加率をまとめた棒グラフである。棒グラフ中には、参考として、実験②の結果の一部である、同じ設置距離・設置角度条件で目標位置がシート中央の場合 ($D/L = 0.375$, $\theta = -30^\circ \sim 0^\circ$, $H/L = 0.5$) の結果を同時に示す。これらの結果より、 $H/L = 0.5$ の場合の結果と比較して、 $H/L = 0.75$ の結果では、いずれの設置角度においても制振効果が大きいことがわかる。特に、 $\theta = -10^\circ$ の場合に、レベル A 基準で評価したフラッタ流速が約 50 % 増加し、大きい制振効果が得られる。

Fig. 16 The amplitude change when the flow velocity is increased (a) and the increased rate of flutter velocity with control as compared to it without control (b) in the case of fixed $D/L = 0.375$, $H/L = 0.75$ (and $H/L = 0.5$, for reference) and changed θ from -30° to 0° . These graphs indicate that the suppression effectiveness is much improved when the H/L is changed from 0.5 to 0.75, especially in the case of $\theta = -10^\circ$.

4. ノズルからの空気吹出しと吸込みによる制御効果

4・1 空気流れの可視化実験

ノズルからの空気吹出しと吸込みがシートにどのように作用しているかを明らかにするため、フラッタ制振時のノズル出口付近と、シート周りの空気流れを可視化し、流れ場を調べた。流れの可視化には、スモークワイヤ法を用いた。

ここでは、前章の設置角度を変えた実験②で、制振効果が得られた代表的な設置条件である、 $D/L = 0.375$, $\theta = -10^\circ$, $H/L = 0.5$ の配置のもと実験を行った。図 17 に、制振制御を開始した直後の空気流れを可視化した結果を示す。図 17(a) は、制御開始直後のシートの振動 1 周期 T を 8 分割した写真である。図 17(b) は、吹出し過程と吸込み過程における、ある瞬間の空気吹出し時と吸込み時の写真である。図より、吹出し時には、ノズルからの噴流がシート周りの流れの影響を受け、ノズルを向けた目標位置よりも下流側の流れを変化させることがわかる。一方、吸込み時には、ノズル下部にせん断層渦が生じることがわかる。

Fig. 17 Air flow patterns around the sheet and the nozzle formed by injection and suction airflows with control $\phi_c = 170$ deg. in the case of $D/L = 0.375$, $\theta = -10^\circ$, $H/L = 0.5$, and $U = 1.05U_f$ ($U_f = 8.7$ m/s). The injection air flow is carried to downstream side while it is affected by the main air flow, and simultaneously changes the air flow around the sheet. On the other hand, the suction air flow hardly exerts influence on the air flow around the sheet.

上述の流れの可視化結果と、既往の研究で明らかにされたシートフラッタの励振メカニズムに基づいて、前章で調べた設置パラメータが制振特性に及ぼす影響について考察する。ここでは、制振効果の向上に係る特に重要な設置パラメータであった、設置角度と目標位置が制振特性に及ぼす影響について考察を行う。はじめに、シートフラッタの励振メカニズムについて述べる。既往の研究報告では、シート中央から少し下流付近で行われる正の流体力仕事フラッタを励起すると報告されている(渡辺他, 2016)。つまり、制振効果が大きい設置条件では、この領域における励振流体力を効率的に抑止していると考えられる。

まず、設置角度が制振特性に及ぼす影響を考察する。前章、図 14 (b)より、下流側からシート中央に向けた場

合 ($\theta = -30^\circ \sim -10^\circ$) に、制振効果が得られ、特に $\theta = -10^\circ$ で大きい制振効果が得られることを示した。この場合では、ノズルからの噴流がシート周りの流れに対抗する速度成分を持ち、噴流とシート周りの流れの相互作用により流れが湾曲する (図 17 (b1))。このシート周りの流れの顕著な変化が、制振効果に寄与したと考えられる。特に $\theta = -10^\circ$ で大きい制振効果が得られた理由は、ノズルからの噴流により流れが湾曲したときに、流れの変化がシート中央付近 (流体力仕事为正の領域) に作用し、励振流体力を抑止したためであると考えられる。

同図より、ノズルを上流側からシート中央に向けた場合 ($\theta = 10^\circ \sim 30^\circ$) では、ほとんど制振効果が得られないことを示した。この場合では、シート周りの流れと同方向に空気を吹出すため、吹出された空気は下流方向の速度成分が大きくなる。これにより、シート近くまで噴流の影響が及ぶ前に、すぐに吹出された空気が下流に流されたことで制振効果が得られなかったと考えられる。また、 $\theta = 0^\circ, 10^\circ$ では、流速の増加に伴って、シートの振動振幅がなだらかに大きくなることを示した。この理由は、流れの可視化結果で示した、せん断層渦による加振に起因していると考えられる。

次に、ノズルを向ける目標位置が制振特性に及ぼす影響を考察する。図 15 (b) より、目標位置をシート中央よりも少し上流位置に設定した場合 ($H/L = 0.75$) に、特に大きい制振効果が得られることを示した。ノズルからの噴流はシート周りの流れの影響を受け、少し下流側に流されることから、目標位置がシート中央よりも少し上流位置の場合、シート中央付近の流れを変化させる。そのため、 $H/L = 0.75$ の場合、シート中央付近の流れの変化が流体力とシートの振動変位の位相差を変化させ、励振流体力の発生を効率的に抑止したことで、大きい制振効果が得られたと考えられる。

同図より、目標位置をシート先端に設定した場合 ($H/L = 0$) では、フラッタ流速がほとんど増加しないことを示した。この理由は、ノズルからの吹き出し空気が、シート周りの流れによってシート先端よりも下流側に流れ、シートに制御効果を与えることができなかったからであると考えられる。また、図 15 (a5) より、目標位置をシート上流端に設定した場合 ($H/L = 1$) では、制御を行うと低流速時から振動が励起されてしまうことを示した。この場合では、シート周りの流れを変えた影響が、シート上流端部から下流端部までの広範囲に及び、制御効果を受けるシート領域が広がる。そして、このような場合、シート上の場所によって制振だけではなく励振に作用してしまう領域が生じてしまい、制御時に振動が励起されたと考えられる。

さらに、図 15 (a) より、目標位置 H/L を変えたとき、目標位置がシート中央より上流位置 ($H/L = 0.5 \sim 1$) の場合では、制振に効果的な制御位相が変化することを示した。目標位置 H/L を変えて、空気を吹出す位置をシート中央より上流側に移動させた場合、シート周りの流れの変化がシート中央付近に到達するまでの距離が遠くなる。そして、前述したように、シート中央付近は流体力仕事为正の領域が存在し、フラッタの制振に係る重要な領域であることから、制振に効果的な制御位相が変化したと考えられる。

4・2 シートの周波数応答特性実験

前節では、ノズルからの空気吹き出しと吸込みにより、シート周りの空気流れが変化することを示した。次に、フラッタ制振時に、空気吹き出しと吸込みがシートに与える制御効果を調べるため、ノズルから周期的な空気吹き出しと吸込みをシートに与え、シートの周波数応答特性実験を行った。

実験方法を以下に述べる。ファンクションジェネレータから交流電圧を出力し、デバイスを駆動した。交流電圧の振幅をフラッタ制振時の制御電圧と同程度に設定し、周波数を変化させた。そして、シートの振動変位をレーザ変位計で測定し、空気流れがない場合と ($U = 0 \text{ m/s}$) シートのフラッタ流速以下の空気流れ ($U = 7.0 \text{ m/s}$) がある場合についてそれぞれ周波数応答特性を調べた。表 6 に、実験パラメータを示す。

Table 6 Parameters of the experiment.

Normalized distance D/L	0.375
Device angle $\theta [^\circ]$	-10
Normalized target position H/L	0.5
Amplitude of input voltage [V]	0.5, 1.0
Frequency of input voltage [Hz]	1.0 ~ 20.0
Air flow velocity $U [\text{m/s}]$	0, 7.0

図 18 に、デバイス駆動時のシートの周波数応答特性を調べた結果を示す。図より、空気流れがない場合（図中、●、×）、シートの応答変位は極めて小さく、ほとんど加振されないことがわかる。一方、空気流れがある場合（図中、●、×）、シートのフラッタ振動数である 9.5 Hz 付近の振動数で、空気流れがない場合と比較して応答変位が大きい。この応答変位は、空気流れがない場合の結果より、ノズルからの噴流がシートに直接作用したことによる変位ではないことがわかる。つまり、ノズルからの空気吹出しと吸込みは、シート周りの流れを変化させることでシートに流体力を与える。

Fig. 18 Frequency response characteristics of the sheet with driving the device in the case of $D/L = 0.375$, $\theta = -10^\circ$, $H/L = 0.5$, and. The displacement response is hardly appeared on the sheet when there is no blowing around the sheet, and this means the device hardly applies momentum on the sheet. On the other hand, the displacement response is appeared over 1.0 Hz ~ 20.0 Hz, especially 9.5 Hz (flutter frequency of the sheet), on the sheet when the air flow is blowing around the sheet.

4・3 圧力測定実験

前節までの実験結果より、主にノズルからの空気吹出しが、シート周りの空気流れを変化させることで、シートに流体力を与えることを示した。次に、この流体力がシートにどのように作用しているかを確認するために、周期的な空気吹出しと吸込みを、シートを模擬した平板に与え、平板上に生じる圧力変動を調べた。

図 19 に、圧力測定に用いた平板の写真と実験装置の概略図を示す。実験で使用した平板の長さ、幅はシートの寸法と同じ値とした。平板表面には圧力測定用の孔が多点（ $5 \times 21 =$ 計 105 点）ある。そして、チューブを介して孔と圧力センサと接続することで、平板表面上の圧力を測定した。

実験方法を以下に述べる。ファンクションジェネレータから交流電圧を出力し、制振デバイスを駆動した。交流電圧の振幅をフラッタ制振時の制御電圧と同程度に設定し、周波数をシートのフラッタ振動数である 9.5 Hz に設定した。そして、圧力測定孔にチューブを介して接続された圧力センサで、平板表面上に生じる圧力変動を測定し、平板表面上多点の圧力変動を、位相平均法を用いて計測した。

位相平均法では、平板表面上の各点の圧力と入力電圧を同時測定した。圧力と電圧はほぼ調和振動することから、入力電圧を基準（参照信号）として、1 周期を 16 分割した各位相において、圧力の値をアンサンブル平均することで、平板表面上の 1 周期の圧力変動を求めた。以上の方法で、平板表面上の圧力変動を、空気流れがない場合と（ $U = 0$ m/s）シートのフラッタ流速以上の空気流れ（ $U = 10.0$ m/s）がある場合についてそれぞれ調べた。ここで、風洞からの空気流れは一様流であり、これに起因して生じる圧力変動は十分に小さいことを事前に確認した。表 7 に、実験パラメータを示す。

Table 7 Parameters of the experiment.

Normalized distance D/L	0.375
Device angle θ [$^\circ$]	-10
Normalized target position H/L	0.5
Amplitude of input voltage [V]	0.5
Frequency of input voltage [Hz]	9.5
Air flow velocity U [m/s]	0, 10.0

Fig. 19 Photograph of the plate for pressure measurement and diagram of pressure measurement experiment.

図 20 に、制振デバイス駆動時の平板表面上に作用する圧力変動（非定常圧力の時間変化）を示す．図 20(a) は、風洞の空気流れがない ($U=0$ m/s) 場合の結果，図 20(b) は、シートのフラッタ流速以上の空気流れがある ($U = 10.0$ m/s) 場合の結果である．これらの図は、圧力変動 1 周期 T を 8 分割して示している．また、圧力は実験で得られた最大圧力で正規化し、図中左部にカラースケールを示している．図より、空気流れがない場合 (図 20(a))、ノズルからの空気吹出しと吸込みによる圧力変動はほとんど生じていないことがわかる．このことから、空気吹出しと吸込みによって平板に直接作用する圧力は小さい．一方、空気流れがある場合 (図 20(b))、平板表面上に圧力変動が生じていることがわかる．圧力は空気流れの影響を受け、ノズルを向けた目標位置（平板中央）から下流側に向けて伝播する．つまり、この制振デバイスは、ノズルからの空気吹出しと吸込みによって、シート周りの流れを制御することで制御効果を生み出す．

Fig. 20 Normalized unsteady pressure on the plate with driving the device (speaker) in 0.5 V amplitude and 9.5 Hz frequency in the case of $D/L = 0.375$, $\theta = -10^\circ$, $H/L = 0.5$. The pressure fluctuation is hardly generated on the plate when there is no blowing around the sheet, and this indirectly means the device hardly applies momentum even on the sheet. On the other hand, the pressure fluctuation is generated on the plate and is propagated to the downstream side when the air flow is blowing around the plate.

本章で述べた3つの節の結果を総括し、本制振手法の制御効果を述べる。本制振手法は、ノズルからの噴流をシートに直接当ててフラッタを制振するのではなく、ノズルからの空気吹出しと吸込みによりシート周りの流れを変化させてフラッタを制振する、能動的な流れ制御に基づく手法である。提案する制振デバイスは、シートの振動変位に対して適切な位相差で空気吹出しと吸込みを行うことで、シートに作用する流体力を制御してフラッタを非接触で制振する。

5. まとめ

本研究では、ノズルからの空気吹出しと吸込みを利用するシートフラッタの非接触制振手法および制振デバイスを新たに提案した。そして、シートフラッタに対する有効性を示すと同時に、制振効果の大きいデバイスの設置条件を検討した。また、高流速中で発生するフラッタの抑止を目標として、制振効果を定量的に評価した。最後に、ノズルからの空気吹出しと吸込みによる制御効果を、フラッタ制振時における流れ場の様子、周波数応答、圧力変動の観点から調べた。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) フラッタ発生時のシート周りに空気吹出しと吸込みを作用させることで、シートフラッタの非接触制振が可能である。本制振手法を用いることで、シートの振動振幅がシート長の1.5%の振幅に達するまでの流速で評価したフラッタ流速（レベルA基準）が非制御時と比較して約50%増加する。
- (2) ノズル出口とシート間の距離が遠いと、ノズルからの噴流の効果がシートまで及ばず、制振効果が得られない。そのため、制振効果を得るには、ノズルがフラッタ発生時のシートに接触しない程度に距離を近づける必要がある。
- (3) シート周りの流れに対抗する速度成分を持ったノズルからの噴流は、シート周りの流れとの相互作用により、シート周りの流れを湾曲させる。このことから、ノズルを水平よりも少し上流側に向けて設置することで、水平に向けて設置するよりも大きい流れの変化をシート周りに生み出し、制振効果が向上する。
- (4) ノズルからの噴流は、シート周りの流れの影響を受け、吹出した位置よりも下流側の流れを変化させる。そのため、シート中央よりも少し上流側で空気吹出しと吸込みを行うことで、シート中央付近（流体力仕事が正の領域）の流れを制御することができ、制振効果が向上する。
- (5) 提案する制振デバイスは、ノズルを通して空気吹き出しと吸込みを交互に行うことで、シート周りの流れを変化させる。本制振手法は、能動的な流れ制御に基づくフラッタ制振手法であり、シートの振動変位に対して適切な位相差で空気吹出しと吸込みを行うことで、シートに作用する流体力を制御してフラッタを制振する。

今後の展望として、制御パラメータの決定には、自動チューニングアルゴリズム（例えば、機械学習や組み合わせ最適化アルゴリズム）を本制御システムに組み込むアプローチが有望と考えられる。自動チューニングアルゴリズムを構築し適用できれば、制御パラメータ設定が容易になり、制振効果の更なる向上を図ることが可能となる。

文 献

- Ffowcs Williams, J. E. and Huang, X. Y., Active stabilization of compressor surge, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.204 (1989), pp.245-262.
- Han, J. H., Tani, J. and Qui, J., Active flutter suppression of a lifting surface using piezoelectric actuation and modern control theory, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.291 (2006), pp.706-722.
- Huang, X. Y., Active control of aerofoil flutter, *AIAA Journal*, Vol.25, No.8 (1987), pp.1126-1132.
- 金子成彦, 呉小山, 離散はり要素を用いたすきま流れによって発生するシートフラッタ解析, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.68, No.675 (2002), pp.3314-3321.
- 菊池正憲, 平野公孝, 長谷川智一, 弓削俊夫, 市川明夫, 黒坂満, 音波を利用した翼フラッタの抑制, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.61, No.592 (1995), pp.4366-4370.
- 西原崇, 金子成彦, すきま流励起振動のアクティブコントロール, *日本機械学会 AVD シンポジウム講演論文集*,

No.940-9 (1994a), pp.88-91.

西原崇, 金子成彦, 付加流体力による片持はりのすきま流励起振動のアクティブ制振, 機械力学・計測制御講演論文集, Vol.B, No.940-26 (1994b), pp.633-636.

Tang, L. and 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.

Tang, L. and Paidoussis, M. P., The influence of the wake on the stability of cantilevered flexible plates in axial flow, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.310 (2008), pp.512-526.

Tang, L. and Paidoussis, M. P. and Jiang, J., Cantilevered flexible plates in axial flow: Energy transfer and the concept of flutter-mill, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.326 (2009), pp.263-276.

利光和彦, 大塚武, 半田博子, 難波昌伸, 翼フラッタの音波によるアクティブコントロール(第1報, 低周波数, 翼面に平行にスピーカ面を配慮した場合), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.69, No.683 (2003), pp.1637-1643.

利光和彦, 山方章弘, 長井健一郎, 難波昌伸, 翼フラッタの音波によるアクティブコントロール(第2報, 低周波数翼列フラッタへの適用, 翼端壁面に音源を配置した場合), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.70, No.691 (2004), pp.678-684.

渡部洋八郎, 河野和清, 末岡靖裕, 榎奥信之, 印刷機械の折機内挙動安定化, 三菱重工技報, Vol.31, No.2 (1994), pp.87-90.

渡辺昌宏, 長谷川亜紀, 原謙介, Gonzalez, M. and Cuadrado, J., 非定常揚力面理論に基づく有限幅矩形シートの三次元フラッタ解析と風洞実験, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.841(2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00170.

Watanabe, Y., Suzuki, S., Sugihara, M., and Sueoka, Y., Experimental study of paper flutter, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.16 (2002), pp.529-542.

呉小山, 金子成彦, 離散はり要素を用いたすきま間内で発生するシートフラッタの非線形解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.69, No.687 (2003), pp.2991-2998.

山口信行, 横田和彦, 辻本良信, 柔軟で薄いシート的高速気流中における挙動に関する研究(第1報, 微小擾乱的挙動の理論的評価方法), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.632 (1999), pp.1224-1231.

References

Ffowcs Williams, J. E. and Huang, X. Y., Active stabilization of compressor surge, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.204 (1989), pp.245-262.

Han, J. H., Tani, J. and Qui, J., Active flutter suppression of a lifting surface using piezoelectric actuation and modern control theory, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.291 (2006), pp.706-722.

Huang, X. Y., Active control of aerofoil flutter, *AIAA Journal*, Vol.25, No.8 (1987), pp.1126-1132.

Kaneko, S. and Wu, X., Leakage flow induced sheet flutter analysis using discretized beam elements, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.68, No. 675 (2002), pp.3314-3321 (in Japanese).

Kikuchi, M., Hirano, K., Hasegawa, T., Yuge, T., Ichikawa, A., and Kurosaka, M., Suppression of aerofoil flutter using sound waves, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.61, No.592 (1995), pp.4366-4370 (in Japanese).

Nishihara, T., and Kaneko, S., Active control of leakage flow induced vibration, *Proceedings of AVD symposium*, No.940-9 (1994a), pp.88-91 (in Japanese).

Nishihara, T., and Kaneko, S., Active vibration suppression of a cantilever beam subjected to leakage flow by additional fluid force, *Proceedings of Dynamics, Measurement and Control Division*, Vol.B, No.940-26 (1994b), pp.633-636 (in Japanese).

Tang, L. and 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.

Tang, L. and Paidoussis, M. P., The influence of the wake on the stability of cantilevered flexible plates in axial flow, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.310 (2008), pp.512-526.

Tang, L. and Paidoussis, M. P. and Jiang, J., Cantilevered flexible plates in axial flow: Energy transfer and the concept of flutter-mill, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.326 (2009), pp.263-276.

Toshimitsu, K., Otsuka, T., Handa, H., and Namba, M., Active control of a blade flutter by means of acoustic excitation (1st report, The case of low frequency vibration and setting sound source in parallel with a blade surface), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.69, No.683 (2003), pp.1637-1643 (in Japanese).

- Toshimitsu, K., Yamagata, A., Nagai, K., and Namba, M., Active control of a blade flutter by means of acoustic excitation (2nd report, The case of low frequency cascade flutter and setting sound source on the wall at blade tip), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.70, No.691 (2004), pp.678-684 (in Japanese).
- Watabe, Y., Kohno, K., Sueoka, Y., and Makioku, N., Stabilization of paper behavior of printing press, Mitsubishi Juko technical report, Vol.31, No.2 (1994), pp.87-90.
- Watanabe, M., Hara, K., Gonzalez, M., and Cuadrado, J., Three dimensional flutter analysis of a rectangular sheet based on the unsteady lifting surface theory and wind-tunnel experiments, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.82, No.841 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00170.
- Watanabe, Y., Suzuki, S., Sugihara, M., and Sueoka, Y., Experimental study of paper flutter, Journal of Fluids and Structures, Vol.16 (2002), pp.529-542.
- Wu, X., and Kaneko, S., Nonlinear analysis of leakage flow induced sheet flutter using discretized beam elements, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.69, No.687 (2003), pp.2291-2998 (in Japanese).
- Yamaguchi, N., Yokota, K., and Tsujimoto, Y., Fluttering behavior of a flexible thin sheet in high-speed flow (1st report, theoretical method for prediction of the sheet behavior for small perturbed motion), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.65, No.632 (1999), pp.1224-1231 (in Japanese).