

鉛直保持された柔軟ウェブのフラッタに関する風洞試験結果

山 口 信 行¹ 緒 方 正 幸²

Wind Tunnel Tests on Flutter Phenomena of Vertical Webs of Very Thin and Flexible Material

Nobuyuki YAMAGUCHI¹, Masayuki OGATA²

Flutter phenomena of webs employed in many processes in, for example, printing machines and film making plants, etc. are very important in determining the upper limit of the film speed. In this report, with attention to the gravity effects on the phenomena, behaviors of vertical webs were surveyed in a vertical-type wind tunnel constructed for the purpose, for comparison with the experimental data on the horizontal webs by the authors in the past. Although the experimental results showed no substantial differences between the vertical webs and the horizontal ones, the vertical webs tended to have slightly lower flutter speed and occurrence of some more modes of web-plane movements not seen in the horizontal situation. It suggests a higher degree of freedom allowed for the vertical web movement in the absence of the gravity component normal to the web plane.

キーワード：柔軟シート、フラッタ、空力弾性、ウェブ

Keywords : Flutter, Flexible thin sheet, Aerodynamic elasticity, web

1. 前書

印刷機や各種の情報機器、またフィルム製造機等の産業機械では、薄くかつ柔軟な枚葉シートあるいは連続帯状のウェブ（紙、プラスチック・フィルム、布、等）を空気中で高速走行させ、あるいは高速でハンドリングする操作が多く、その際ばたつきが発生しやすく、品質に重大な影響が出やすい。これをコントロールすることができれば、例えば印刷機を例にとれば、印刷の品質の向上、高速化、印刷された紙の折れやしわの減少、等の大きな改善が得られる。この種の機械の高速化や製品品質の向上にとってシート挙動の安定化は不可欠である。

情報機器や媒体の多様化と高速化に伴い、シートやウェブの挙動の予測に対する必要性が非常に高まっている。しかし、シートやウェブの作動状況、運動様式、剛性、慣性力、空気力、等が複雑に干渉し合う現象であるため、取扱いが困難であり、これまで現場の対応によって状況の改善や改良が進められる場合がほとんどだったと思われる。

著者らはこれらの状況に関し、解析的なフラッタ発生限界に関する検討および風洞実験によるフラッタ速度の調査を行い、現象の解明と、多様なパラメタとその変化に影響されるフラッタ限界の全体的状況の定量的明確化に努力し

てきた（資料⁽¹⁾⁻⁽¹³⁾参照）。それらの結果は、最近発刊されたウェブハンドリングに関する幾つかの図書の技術的背景の一部として紹介されている（資料^(14, 15, 16)）。

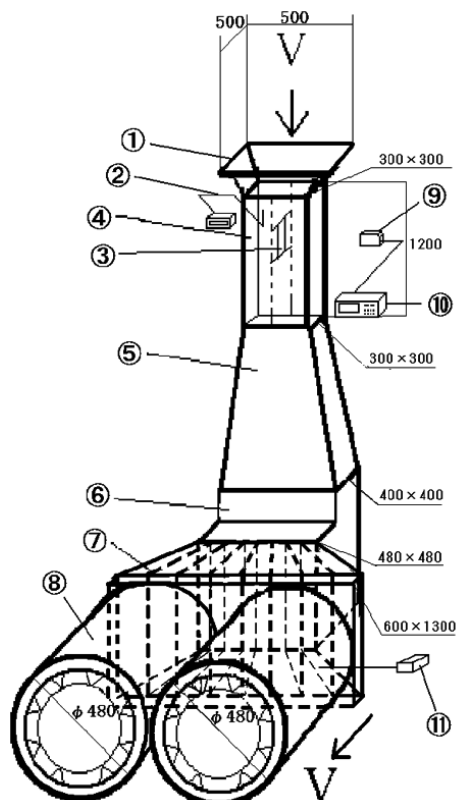
その研究上の実験的手法として水平置き風洞による風洞実験と観察を利用してきた。しかし可視化写真などによると水平姿勢の柔軟ウェブは下垂する傾向があるようであり（山口、他⁽⁸⁾）、これが何らかの影響を及ぼしていないか気がかりであった。そこで縦型風洞を製作し、鉛直状態のウェブ基本形態に関するフラッタ試験を行ったのでそれに関して報告する。

2. 実験装置

本研究のために今回製作した縦型風洞装置の概略図を図 1 に、各部分の名称とともに示す。これは吸込み型の風洞で、試験部分の中 2 階の床から上に突出して設けられている。図 2 に測定部分の写真を示す。縦型風洞の吸い込みノズルの直下流に長さ 1200 mm、縦、横 300 mm の正方形断面の亚克力風路を設け、試験片を気流に平行に設置して実験を行った。亚克力風路は試験片を取り付けやすいように左右に分割できる構成になっている。このように大気からノズルを介して吸い込む縦型風洞では気流乱れが小さく、状態が良いと考えられる。

1 明星大学 名誉教授 専門分野 流体工学、流体機械 yamaguchi_nandm@hb.tp1.jp

2 明星大学理工学部 総合理工学科 機械工学系 准教授 専門分野 流体工学、流体機械



① 吸い込みベルマウス, ②ピトー管および微差圧計, ③試験片, ④アクリル風路, ⑤ディフューザ, ⑥転向部, ⑦整流拡大部, ⑧誘引軸流ファン, ⑨可視光レーザ式変位センサ, ⑩マルチパーパス FFT アナライザ, ⑪インバータ

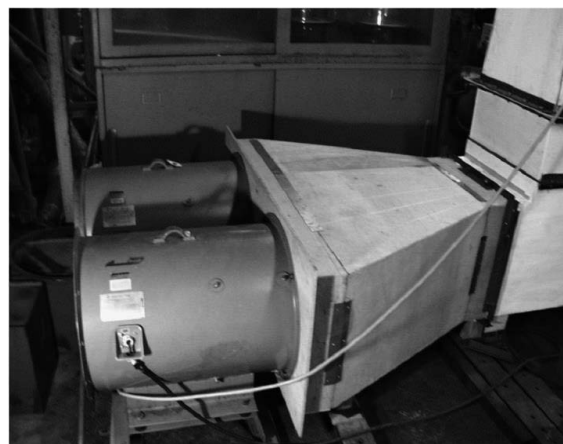
Fig. 1 Outline of the experimental set-up for the vertical flutter test in the vertical wind type



Fig.2 Test section of the vertical wind tunnel



(a)



(b)

Fig.3 Important parts of the vertical wind tunnel, (a) diverging part with splitter plates, and (b) two sets of axial flow fans for induction of air at the downstream end of the wind tunnel

風洞出口部分の拡大・整流部分と吸込み用ファンの写真を図3に示す。誘引用送風機は1階に設置してある。風量の関係から軸流送風機2台を並列に用いた。

測定部の拡大図を図4に示す。柔軟な紙などの試験片の前縁を上部支持金物④に固定し、後縁を下部支持装置⑦に固定する。⑦は図5に示されるように試験片の後縁を支持するクランプが、左右には動かず、上下方向のみ移動できるようになっている。これには加重装置（テンショナー）⑥が吊り下げられ、必要な軸方向の張力を与えるようになっている。縦型では後縁支持クランプの重量が重りの役割もするので、設定張力が小さい場合には、滑車を介して重りにより引き上げ、クランプ装置の自重をある程度キャンセルさせている（図4の⑥）。大きい張力をつける場合は支持クランプにさらに重りをつける。

3. 実験方法

図4に示す測定部は長さ1200mm、縦、横300mmの正方形断面をもつ。表1に示す270-370mmの長さの供試片の紙をウェブ基礎形態に設定し、張力を設定する。ここで、ウェブ基礎形態とは、前後縁が単純支持され、一様流中におかれて面に垂直方向に2次元横振動するウェブを称している。

この状況でフラッタが発生するまで風速を徐々に上げてゆく。同時にレーザー式非接触変位計でシート振幅を測定し、振幅の急増する点をフラッタ発生点とする。この手順

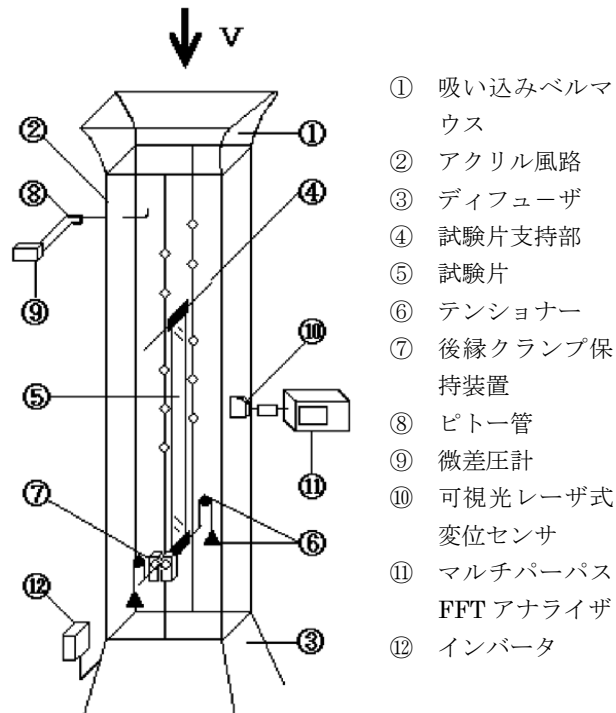


Fig.4 Enlarged view of the test section of the vertical flutter test of a thin and flexible sheet material

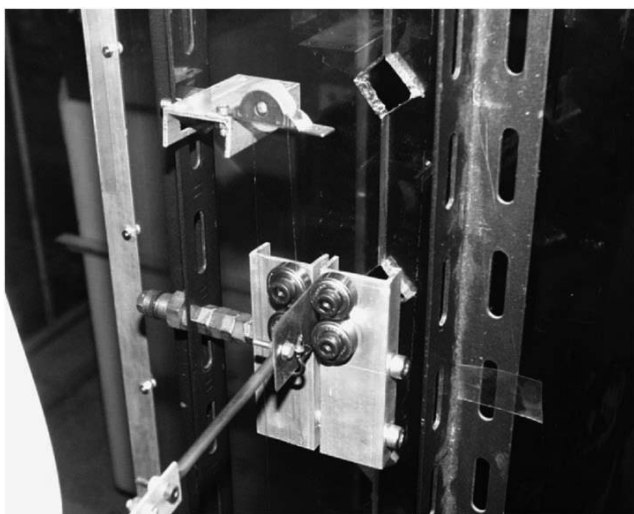


Fig.5 Fixing device of the trailing edge of the test piece allowing small vertical movement ensuring the vertical orientation

Table 1 Main numerical figures of the test pieces

Test piece	YUPO tracing paper
Length L_s (mm)	270-370
Width b_s (mm)	30-90
Thickness t_s (μ m)	51
Density ρ_s (kg/m ³)	814
Young's modulus E_s (GPa)	1.67

はこれまで報告した横型風洞におけるフラッタ試験と同じである。供試片の紙のサイズを種々変えて測定を行った。ヤング率は別途測定した(山口⁽¹²⁾)。

4. 結果の無次元化

以下の検討では、ウェブの運動を支配する次の無次元パラメタを用いて結果を表示する(山口, 他^(5, 6), Yamaguchi, etc.⁽³⁾)。これらの量は二次元運動としての本現象に関わってくる主な力や状況に関わる次の5量、すなわちウェブの曲げ剛性、ウェブ張力、ウェブの慣性力、関与する空気力、振動数を適切に無次元化することにより現れるもので、基本的な解析的基礎式中でも自然に現われてくる(山口, 他⁽¹⁾, Yamaguchi, etc.⁽³⁾)。これらの無次元量により広範囲のパラメタ変化に対するフラッタ限界が実験的にも解析的にも適切に表現されることが報告されている(山口, 他^(2, 5-7), Yamaguchi, etc.^(4, 8))。

$$\text{張力/曲げ剛性比 } \tau^* = (T/E_s t_s b_s) 12 (L_s/t_s)^2 \quad (1)$$

$$\text{流体力/張力比 } \sigma^* = (\rho_a U_a^2 L_s b_s) / T \quad (2)$$

$$\text{無次元振動数 } f_R = f L_s / U_a \quad (3)$$

$$\text{質量比 } \mu = \rho_s t_s / \rho_a L_s \quad (4)$$

ここで T : 張力(N)、 E_s : ヤング率(Pa)、 L_s : シート長さ(m)、 t_s : シート厚み(m)、 b_s : シート幅(m)、 ρ_s : シート密度(kg/m³)、 ρ_a : 流れ密度(kg/m³)、 U_a : フラッタ発生流速(m/s)、 f : フラッタ振動数(Hz)。

曲げ剛性はシートあるいはウェブの変形のしやすさあるいはしにくさを表す量であり、シートフラッタやウェブのフラッタに全体的に影響する量である。ここでは1種類の紙のみを供試材として用いているので曲げ剛性の値の変化は少ないが、力の基準量として、これまでの結果とも対比するために利用している。

流体力/張力比 σ^* はフラッタ限界での風速に基づく動圧による流体力をウェブ張力で規準化した量である。

流れによる表面摩擦も張力の一部に加わってくるが、片持ちシートの場合と違って両端支持のウェブでは張力が相対的に大きいのでここでは考慮していない。

質量比 μ はこの実験では0.13-0.094の範囲にある。これらはこれまでの著者らの水平ウェブ実験に用いられたものと同程度であり、結果の対比において影響しないと考えられた。

重力の影響については、ここでは実験結果から定性的に考えることにする。

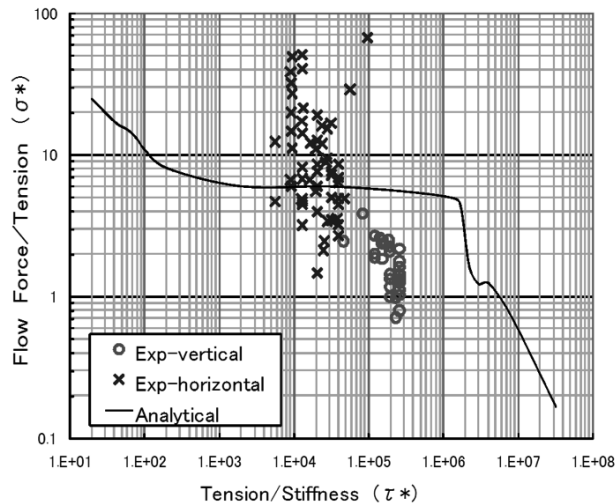


Fig. 6 Flutter limit in terms of the fluid force/web tension σ^* against the web tension/sheet stiffness τ^*

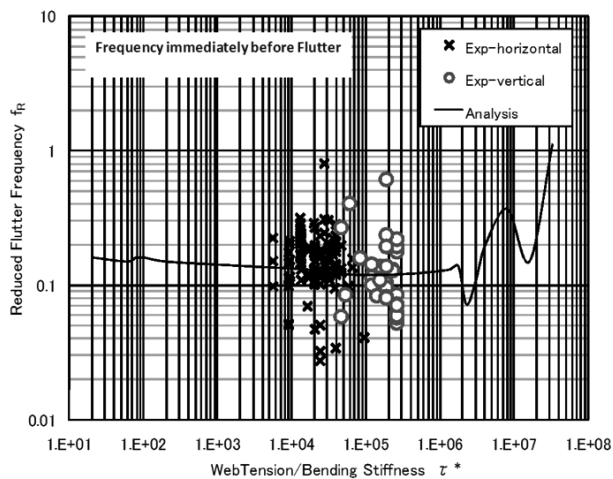


Fig. 7 Pre-flutter reduced frequency f_R immediately before flutter for the web tension/sheet stiffness τ^*

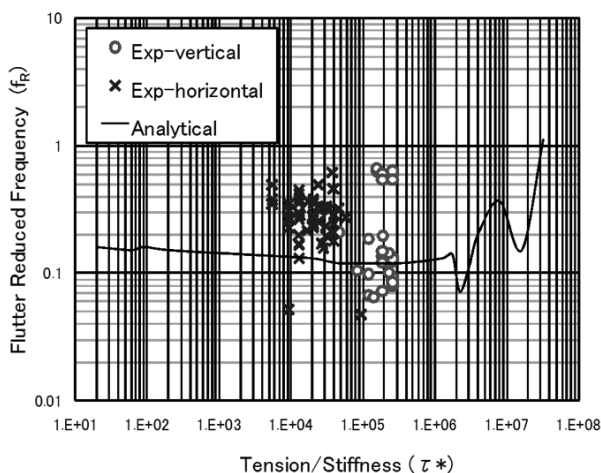


Fig. 8 In-flutter reduced frequency f_R for the web tension/sheet stiffness τ^*

5. フラッタ発生点

5.1 フラッタ速度

図 6 にフラッタ限界での流体力/ウェブ張力比 σ^* の実験値をウェブ張力/ウェブ曲げ剛性比 τ^* に対して示す。鉛直ウェブ (Exp-vertical データ、○マーク) と水平ウェブ (Exp-horizontal データ、×マーク) に対する比較である。

実線は解析的フラッタ限界線で、2 次元一様流中に置かれた 2 次元薄板の運動を、微小擾乱を仮定して、材料力学基本式によるシート運動とポテンシャル流れ中の分布渦の運動を組み合わせることで、重力の影響は含まれていない (山口、他⁽¹⁾、Yamaguchi, et al.⁽³⁾)。この解析手法はこれまで著者らが行ってきた前縁片持ち吹き流しシート (山口、他^(2,5)、両端固定ウェブ (山口、他^(6,7,9)、後縁片持ち平板 (横田、他⁽¹³⁾)、等の様々な形態でのフラッタ限界に関する研究において、広いパラメタ範囲にわたってフラッタ発生条件を予測し、対応する実験データを、ばらつきはかなりあるが平均的には良く予測している。

解析的予測 (実線) によれば、例えば同一の曲げ剛性を持つウェブ材の場合、大略 $1 \times 10^3 < \tau^* < 2 \times 10^6$ の範囲では張力を変えてもフラッタ限界流体力/張力比は変わらない。すなわち、フラッタ速度は張力の平方根に比例する。ただしそれ以上の張力比 τ^* ではフラッタ速度が急減することが予測されている。次節に示すように高次モードのフラッタに移行するためである。ウェブ張力を増やすことによりフラッタ限界流速を向上させてフラッタの抑制を図る場合の効果と限界がこの実線から見てとれる。

図 6 の実験データでは、水平ウェブは平均的には予測に近いフラッタ限界を示しているのに対し、鉛直ウェブは予測値に比して低めのフラッタ限界速度を示している。ここで行った張力範囲の試験では、参照している図中の解析的予測線との対比から、水平ウェブも鉛直ウェブも 1 次のフラッタ発生であると考えられる。次節のフラッタ周波数のデータもこれを示している。この 1 次のフラッタの範囲内で、鉛直ウェブでは水平ウェブに比べフラッタがより低速で起こっていると考えられる。後にも述べるが、鉛直ウェブでの面垂直方向 (水平方向) の動きやすさが関わっていると推測される。水平ウェブの場合、重力が面垂直方向に作用し、ウェブ形態が下垂気味となり、流れが多少影響されている可能性もある。

このフラッタ限界のずれについては装置上の何らかの因子の影響も考えられなくもないが、まだ十分検討できていない。

5.2 フラッタ振動数

図 7 にフラッタ直前のウェブ振動数 (Pre-flutter 条件) をウェブ張力/曲げ剛性比 τ^* に対して示す。図 7 は図 6 に対応するデータである。実線は解析的に予測された無次元フラッタ振動数である。大略 $1 \times 10^2 < \tau^* < 2 \times 10^6$ の範囲ではほぼ 0.13-0.16 程度の範囲にあり、1 次モードのフラッタ

が発生することが予測される。これより大きい張力比 σ^* の領域では急激な振動数変化が予想され、高次モードのフラッタが発生する。実験データは 1 次モードのフラッタの範囲にあり、バラツキが大きい、水平ウェブでも鉛直ウェブでも平均的には解析的フラッタ予測値に近い。解析的予測値は微小擾乱によるものであり（山口、他⁽¹⁾、Yamaguchi、etc.⁽³⁾）、フラッタ発生直前の状態はその状況に合うものと考えられる。

これに対してフラッタ発生後（In-flutter 条件）の振動数を図 8 に示す。水平ウェブでは全体的に解析的予測よりもやや高めであるが、鉛直ウェブでは比較的予測に近い。フラッタ発生後の振幅はかなり大きくなり、流れの乱れも増加するので、微小擾乱を想定する解析結果からずれてきた可能性は大きい。もう一つの原因としては、鉛直ウェブでは変形が面を中心にして対称に起こりやすいことに関係していると考えられる。これに対して水平ウェブの形態は重

力により全体として中央で下垂しているため、フラッタ時の大振幅では面の振動は下垂形態に乗った形になり（山口、他⁽⁸⁾）、振動数が多少ずれる可能性も考えられるであろう。

以上の図 6-8 を総合してまとめた結果として、流体力/ウェブ張力比 σ^* に対するフラッタ無次元振動数 f_R のプロットを図 9 と 10 に示す。図 9 が pre-flutter データ、図 10 が in-flutter データを示す。青○と黒×はそれぞれ鉛直ウェブと水平ウェブに関する結果、赤菱形◆マークは解析的予想点を示す。フラッタ速度とフラッタ振動数の間の相関、そして水平ウェブと鉛直ウェブの比較を調べたいと考え、作成した図である。

これらのデータはフラッタ速度とフラッタ振動数の間の相関を特に示しているようではないが、図 7 と図 8 で述べた鉛直ウェブと水平ウェブの違いを明らかに示している。主に、フラッタ振動数は鉛直ウェブの方が pre-flutter 条件でも in-flutter 条件でも予想に近いこと、そしてフラッタ速度は鉛直ウェブでは予想よりやや低め、水平ウェブではやや高めを示すことである。これらの比較は上で述べた鉛直ウェブでの動きやすさとその面对称性を再び示唆している。ただしその動きやすさは縦型と横型風洞におけるウェブ支持方法や装置の違いとも関連している可能性もある。

水平ウェブの場合も含めて全体的に実験データのかなりのバラツキが見られるが、低風速であることや、前後縁の固定法、荷重のかけ方などが微妙に影響する実験であるため、やむえない状況である。多数のデータの平均的な傾向で結果を考えざるを得なかった。

6. 縦型風洞での観察

軽量で柔軟なシートやウェブの挙動には様々な因子の影響が現れやすいようである。またフラッタだけではなく、様々な現象が現れやすいようであり、注意を要する。

鉛直風洞中でのウェブフラッタ試験片の流速に対する挙動を観察すると、図 11 に示す状況が見られた。風速を上げてゆくと、張力にかかわらず、まず 3-4 m/s で微振動（図 11 中の◇マーク）が起こる。

次に、図 12 右図に見られる供試片上流側と下流側での断面のねじれ振動（図 11 の■マーク）が、必ず起こるわけではなかったが、フラッタ前に時々見られた。その後フラッタ（◆マーク）が発生するが、これは張力が高いほど高風速で起こる場合が多く、またバラツキも多い。これらの点のデータを規準化したものが既に示した図 6 である。フラッタ後、さらに流速を上げると、図 12 左図に見られるような試験片中央部分が横方向に偏って大きくたわむ静止の状態が図 11 中の×マーク（Large Deflection）で示されるように多く見られた。風洞壁面に強く吸い寄せられて安定化しているようである。これらが横型風洞での実験結果とは多少異なった状況であった。縦型風洞では重力の方向がウェブの方向に一致しており、ウェブの横運動を拘束しにくいいためと思われる。

水平ウェブでは面に垂直に作用する重力によりウェブ面

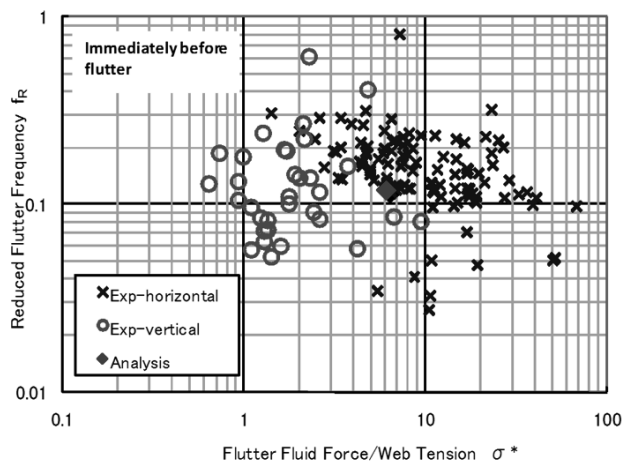


Fig.9 Comparison of reduced flutter frequencies in pre-flutter conditions against fluid force/web tension σ^* in conditions of horizontal webs and vertical webs

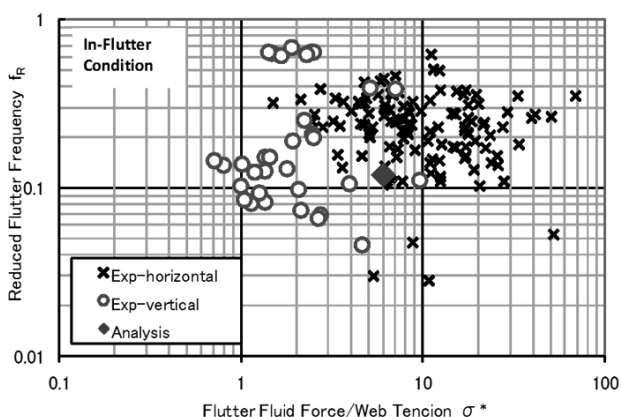


Fig.10 Comparison of reduced flutter frequencies in flutter conditions against fluid force/web tension σ^* in conditions of horizontal webs and vertical webs

中央がわずかに下垂してたわんだ状態が通常であり、その影響がウェブ周りの流れの上下非対称性に影響する大きな因子になっているのは確実である。一方、鉛直ウェブには重力の面垂直方向の成分は存在しないため、ウェブ面に垂直な方向には流体力が運動を司る主たる力の一つとなり、面垂直方向の運動（ねじれを含めて）が起こりやすいと考えられる。また高速度では流体による流路壁面へのひきつけ力の影響が明瞭に出やすく、流体力が張力や曲げ剛性などの復元力よりも十分大きくなって発生する静的不安定、いわゆるダイバージェンスと言うべき静的大変形が起こっている状況と考えられる。

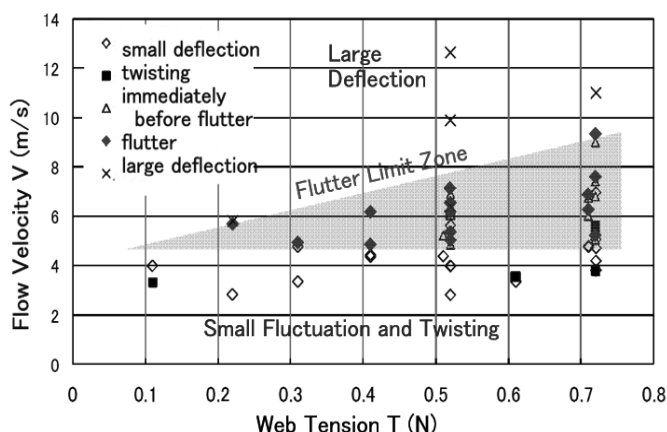


Fig. 11 Observations about the web behaviors in the vertical test section

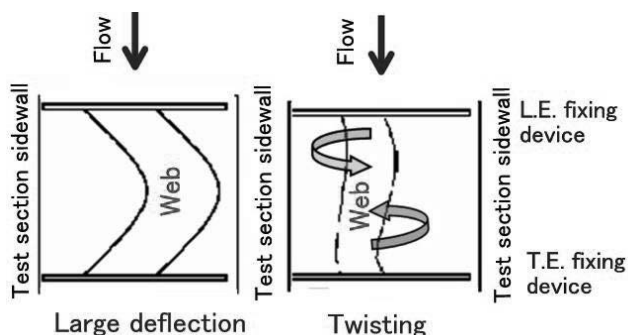


Fig. 12 Sketches of the web movements

7. まとめ

鉛直ウェブでは、水平ウェブに比較して、フラッタ速度がやや低めであること、フラッタ振動数はほとんど異ならないこと、そして水平ウェブでは観察されていない幾つかの運動が起り易いこと、などが観察された。鉛直ウェブにおいて重力の影響による平均的面変形が少ないこと、同時に、かつそれと関連して水平ウェブよりも面垂直方向に自由に動きやすいこと、などが影響してこれらの結果の多少のずれをもたらしていると推測される。

8. 結 言

本風洞は明星大学機械工学科旧流体実験場の一階と中2階を利用して製作・組立・設置され、2年間研究に利用された。残念ながら、理工学部新ビルの建設にあたって取り壊された。その後種々の事情で縦型風洞によるウェブフラッタ実験は継続できなかった。しかし、目的は一応達したと考えている。ここに報告して、記録に留めておくことにしたい。

これらの観察がこの分野の関係諸氏のご参考に多少でもなれば幸いである。

謝 辞

本実験研究の実施にあたり、本縦型風洞および測定部の設計から製作まで卒業研究の一環として学生諸君が当たったことをここに特記しておきたい。それらの風洞の計画、製作と改良、そして実験と研究を担当された次の学生諸氏に深く感謝する。平成14年度大学院修士課程修了生浜地武士氏、そして卒研学生諸氏、特に平成13年度卒業生：佐瀬友昭氏、林孝彦氏、八倉巻泰介氏、平成14年度卒業生：鈴木洋介氏、そして綿貫亮氏。

記 号

b_s	ウェブ幅 (m)
E_s	ウェブ素材ヤング率 (Pa)
f_f	フラッタ振動数 (Hz)
f_R	フラッタ無次元振動数
L_s	ウェブ長さ (m)
T	張力 (N)
t_s	ウェブ厚さ (m)
U_∞, V	一様流速 (m/s)
μ	質量比
ρ_a	空気密度 (kg/m^3)
ρ_s	ウェブ素材密度 (kg/m^3)
σ^*	フラッタ発生点流体力/張力比
τ^*	張力/曲げ剛性比

引 用 文 献

- (1) 山口信行, 横田和彦, 辻本良信, 柔軟で薄いシートの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法), 日本機械学会論文集 (B編), Vol.65, No.632, pp.1224-1231, (1999.4)
- (2) 山口信行, 関口徹, 横田和彦, 辻本良信, 柔軟で薄いシートの高速気流中における挙動に関する研究 (第2報、低質量比領域における実験結果および予測される挙動), 日本機械学会論文集 (B編), Vol.65, No.632, pp.1232-1239, (1999.4)
- (3) Yamaguchi, N., Yokota, K., Tsujimoto, Y., Flutter Limits and Behaviors of a Flexible Thin Sheet in High Speed Flow

- I: Analytical Method for Prediction of the Sheet Behavior, Journal of Fluids Engineering, ASME, Vol.122, pp. 65-73, (2000-3)
- (4) Yamaguchi, N., Sekiguchi, T., Yokota, K., Tsujimoto, Y., Flutter Limits and Behaviors of a Flexible Thin Sheet in High Speed Flow – II: Experimental Results and Predicted Behaviors for Low Mass Ratios, Journal of Fluids Engineering, ASME, Vol.122, pp. 74-83, (2000-3)
- (5) 山口信行, シートまたはウェブのフラッタ振動における曲げモードと張力モードの卓越領域について, 明星大学理工学部研究紀要, Vol. 35, pp. 31-37, (1999-3)
- (6) 山口信行, 伊藤恵介, 緒方正幸, 柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界とその挙動に関する研究 (第 1 報) フラッタ限界の予測と風洞試験結果, 日本機械学会論文集(B 編), Vol. 67, No. 663, pp. 2738-2745, (2001-11)
- (7) 山口信行, 伊藤恵介, 緒方正幸, 柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界とその挙動に関する研究 (第 2 報) フラッタ限界に関する幾つかの因子の影響, 日本機械学会論文集(B 編), Vol. 68, No. 665, pp. 144-152, (2002-1)
- (8) Yamaguchi, N., Ito, K., and, Ogata, M., Flutter Limits and Behaviors of Flexible Webs Having a Simplified Basic Configuration in High-Speed Flow, Journal of Fluids Engineering, ASME, Vol. 125, pp. 345-353, (2003-3)
- (9) 山口信行, 浜地武士, 緒方正幸, 柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界データのばらつきと振動モードに関する実験的検討, 明星大学理工学部研究紀要, Vol. 40, pp. 65-72-, (2004-3)
- (10) 緒方正幸, 山口信行, 上流気流加振による柔軟ウェブのフラッタ制御, 明星大学理工学部研究紀要, Vol. 43, pp. 41-46, (2007-3)
- (11) 山口信行, 緒方正幸, 走行ウェブ/ローラー系における流動状況の調査, 明星大学理工学部研究紀要, Vol. 44, pp. 51-57, (2008-3)
- (12) 山口信行, 薄くて柔軟なシート材のヤング率の測定と評価の方法 (研究ノート), 明星大学理工学部研究紀要, Vol. 46, pp. 27-32, (2010-3)
- (13) 横田和彦, 山林正寿, 辻本良信, 山口信行, 一様流中で後縁を支持された柔軟シートの挙動に関する実験および線形安定解析, 日本機械学会論文集(B 編), Vol. 66, No. 641, pp. 127-132, (2000-1)
- (14) 「ウェブ搬送におけるトラブル対策と最適制御技術集」, 第 2 章第 2 節ウェブハンドリングにおけるフラッタ現象, 技術情報協会, pp.109-124, pp.561-565, (2008-9)
- (15) 「フィルム成形・加工とトラブル対策—プロセス改善・条件設定 便覧」, 第 7 章第 5 節 10. ウェブハンドリングにおけるフラッタ現象, 技術情報協会, (2013-3)
- (16) 「“ウェブ” ロール to ロールの搬送技術、巻取り技術 そのトラブル発生メカニズムと対策」, 第 1 章第 11 節, ウェブハンドリングにおけるフラッタ現象のメカニズムと対策, 技術情報協会, pp.100-107, (2013-11)