

ストリーク不安定のモード選択性に関する実験的研究

都立科技大 小西 康郁 (Yasufumi Konishi)

都立科技大 浅井 雅人 (Masahito Asai)

1. はじめに

壁近傍に存在する低速ストリークの不安定性は、壁乱流における乱流構造の生成維持に大きな役割を果たしていると考えられている¹⁻⁴⁾。また、境界層遷移においても、バイパス遷移⁵⁾や凹面境界層のゲルトラー渦^{6,7)}による遷移のように、ストリーク構造の崩壊が遷移の進行に重要な役割を演じる。筆者等の研究室では、層流境界層中に排除厚さ程度の高さの小さな網片を壁に垂直に立て人工低速ストリークを実現し、それに周期攪乱を与えてストリーク不安定性やそれによる組織渦構造の生成過程を実験的に調べている^{8,9)}。これまでに、単一の低速ストリークについて、ヘアピン渦に成長する Varicose モードと蛇行縦渦を生成する Sinuous モードに対する不安定特性が低速ストリークの幅や高さにどのように依存するかを実験的に明らかにした。本研究では、同様の方法でスパン方向に周期的に並んだストリーク列を実現してストリーク列の不安定性を調べ、単一の低速ストリークの結果との比較を行った。

2. 実験装置及び方法

実験は、噴出口 400 mm×400 mm の吹き出し式風洞装置で行われた。境界層平板は、長さ 1200mm、厚さ 10mm のアクリル板であり、前縁は長軸短軸比 12:1 の楕円形に加工してある。座標系は、前縁から流れ方向に x 、平板上面に垂直上向きに y 、スパン方向に z (スパン中心を $z=0$) とする。前縁から 500mm 下流位置 ($x-x_0=0$ mm) に、高さ 2.5mm、幅 6mm の 40 メッシュ網 (開口比 70%) をスパン間隔 12mm で 21 個 (スパン間隔 18mm の場合は 14 個)、壁に垂直に取り付けてある。網の下流 8.5mm には、対称攪乱導入用の小孔 (直径 3mm) が網のスパン中心にあたる位置 ($z=0$) からスパン間隔 6mm で開けてある。さらに網の下流 13.5mm には、反対称攪乱導入用の小孔 (直径 2mm) が網の両端にスパン間隔 6mm で開けてある。それぞれの小孔はビニールホースでラウドスピーカーにつながれ、正弦波信号で駆動し周期変動を励起する。Varicose モードと Sinuous モードのそれぞれに対して、攪乱のスパン方向波長がストリークのスパン間隔に対応する基本モード (Fundamental Mode) とその倍の波長にあたる分調モード (Subharmonic Mode) を励起した。

平均速度 U および変動 u' の測定は熱線風速計で行われた。実験の主流流速はすべて $U_\infty=4.0$ m/s である。網を取り付けた $x=500$ mm での境界層排除厚さは 2.4mm であり、網の高さはこの排除厚さに一致するように選んである。

3. 実験結果及び考察

図1は、ストリーク間隔 $\lambda=12\text{mm}$ の場合における網の下流($x-x_0=50\text{mm}$)での平均速度分布である。網中心位置($z=0$)では、 y 方向に \tanh 型の変曲型速度分布を持ち、網と網の間の位置($z=6\text{mm}$)では、ブラジウス速度分布に近い速度分布を持つことがわかる。また、図2のように、個々のストリークは互いに干渉することなく下流まで維持されており、逆流のない三次元剪断層を持ったストリーク列が実現されている。スパン間隔の広い $\lambda=18\text{mm}$ の網配置の場合も同様のストリーク列が形成される。いずれの場合も、人工攪乱を導入しない場合には層流ストリークが維持されている。

Varicose モードについては、ストリーク間隔 $\lambda=12\text{mm}$ においてのみ不安定特性を調べた。図3は、基本モードと分調モードの u 変動の実効値および位相のスパン方向分布を示している。攪乱の周波数は、最大増幅を得る 90Hz である。位相は、変動の実効値が最大になる位置のものである。両者の実効値分布はほとんど変わらない

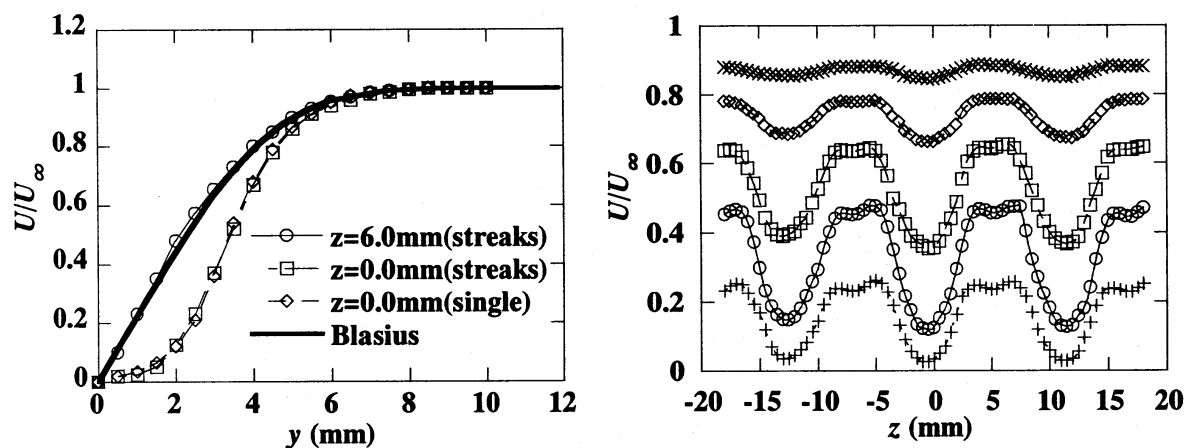


Fig. 1. y - and z - distribution of mean velocity U at $x-x_0=50\text{mm}$. (a); y -distribution, (b); z -distribution at $y=5\text{mm}$, 4mm , 3mm , 2mm , 1mm .

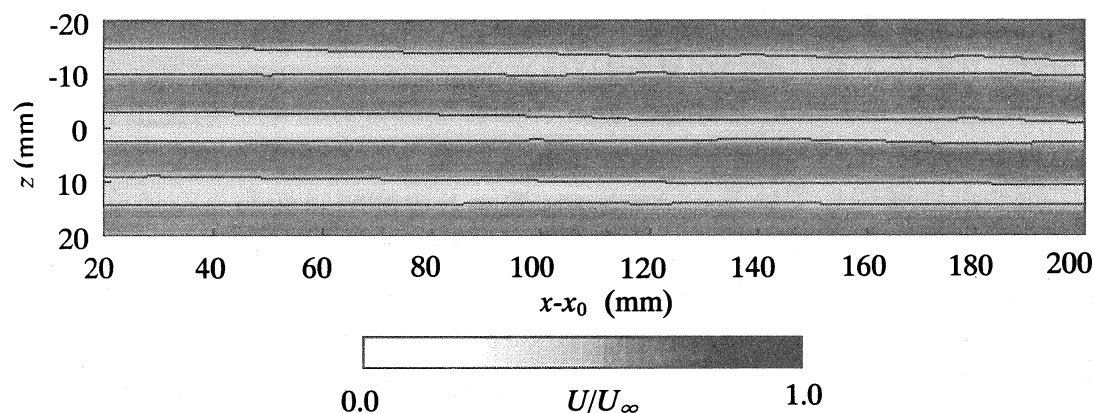


Fig. 2. The low-speed streaks developing downstream of the screens. Iso-velocity contours in the $x-z$ plane at $y=3\text{mm}$.

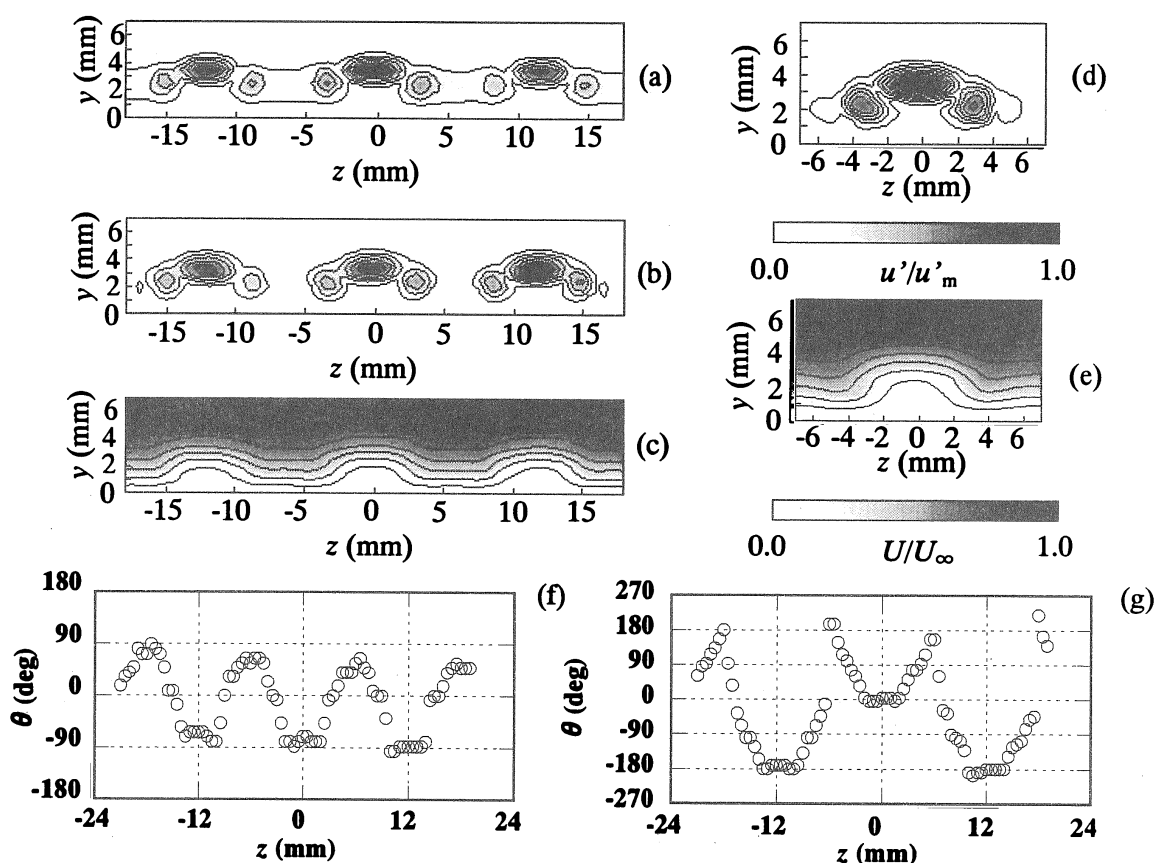


Fig. 3. Amplitude distributions of varicose modes in y - z plane at $x-x_0=60\text{mm}$. (a); u' in fundamental mode, (b); u' in subharmonic mode, (c); mean velocity U for the periodic streaks. (d) and (e); u' and U for the single streak. (e) and (f); phase distributions of fundamental and subharmonic modes at $x-x_0=60\text{mm}$, $y=3.5\text{mm}$ respectively.

いが、位相分布を見ると、基本モードは、隣り合ったストリークにおける位相は同位相であり、分調モードは、隣り合ったストリークで 180° 位相が異なり 2λ の基本波長をもつのがわかる。また、いずれの励起モードも、各ストリーク中心の水平剪断層上に変動の最大値が存在し、この基本的な構造は、図(d)に示す単一ストリークの場合と比べて大きな違いが見られない。

図4は、Varicose モードにおける、種々の周波数の変動増幅を最大実効値の x 方向変化で示している。いずれのモードも 100mm 程度下流まで指数関数的に増幅し、その後、緩やかに減衰している。Varicose モードの増幅は変曲点型速度分布 $U(y)$ のケルビン・ヘルムホルツ不安定に支配され、速度分布が変曲点分布を示すストリーク幅（後流型速度分布の半値幅）に強く影響される。従って、ストリーク上の剪断層の粘性拡散により、ストリーク幅が狭くなり、剪断層厚さとストリーク幅が同程度に近づくと増幅できなくなる。また、周波数選択性については、最大増幅を与える周波数（ 90Hz 付近）は、単一のストリークのそれ（ 110Hz 付近）より少し低周波側にシフトする程度であるが、最大増幅攪乱の増幅率は、基本モードで単一スト

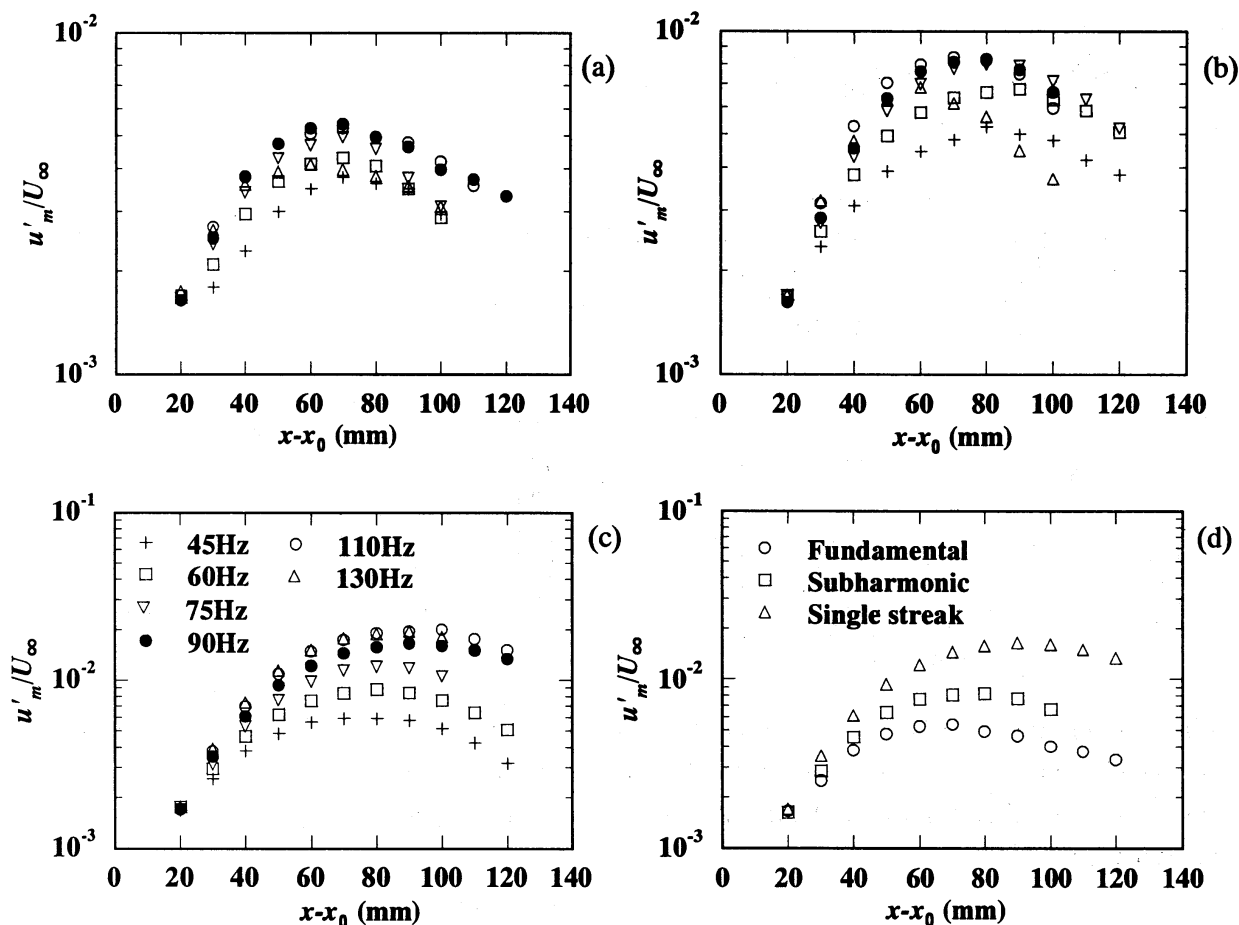


Fig.4. Development of varicose modes. (a); fundamental mode, (b); subharmonic mode, (c) single streak, (d) comparison of 90Hz disturbance (○ fundamental, □ subharmonic, △ single streak).

リークの場合の約 1/2 程度，分調モードで約 2/3 程度まで減少する．このように各ストリーク上の攪乱の干渉は増幅率に顕著に影響を与え得る．

Sinusoidal モードについては，ストリーク間隔 $\lambda = 12\text{mm}$ ， 18mm の 2 ケースについて特性を調べた．図 5 は， $x-x_0 = 60\text{mm}$ での基本モードと分調モードの u 変動の $y-z$ 断面内実効値分布である．ストリーク間隔は $\lambda = 18\text{mm}$ ，攪乱の周波数は，最大増幅を与える 60Hz である．図のように，いずれもストリーク中心の垂直剪断層上で変動は零となり，ストリーク両端にある垂直剪断層上にもみ大きな振幅を持つ．この基本構造も単一の場合と比べて大きな違いは見られない．基本モードと分調モードは，位相の z 分布から確認でき，隣り合う低速ストリークについて基本モードは同位相，分調モードは 180° 反転している，すなわち，攪乱のスパン方向の基本波長は，基本 (Fundamental) モードと分調 (Subharmonic モード) それぞれ λ 及び 2λ である．

図 6 は，種々の周波数の攪乱の増幅を u 変動の最大実効値振幅 u'_m の x 方向変化で示している． $\lambda = 12\text{mm}$ の基本モード以外，いずれの攪乱モードも測定範囲の $x-x_0 = 200\text{mm}$ 以遠まで増幅を続ける．分調モードは，ストリーク間隔 $\lambda = 12\text{mm}$ と 18mm のいずれの場合も，ほぼ単一ストリークの場合と同等の増幅を示す．基本モードは，

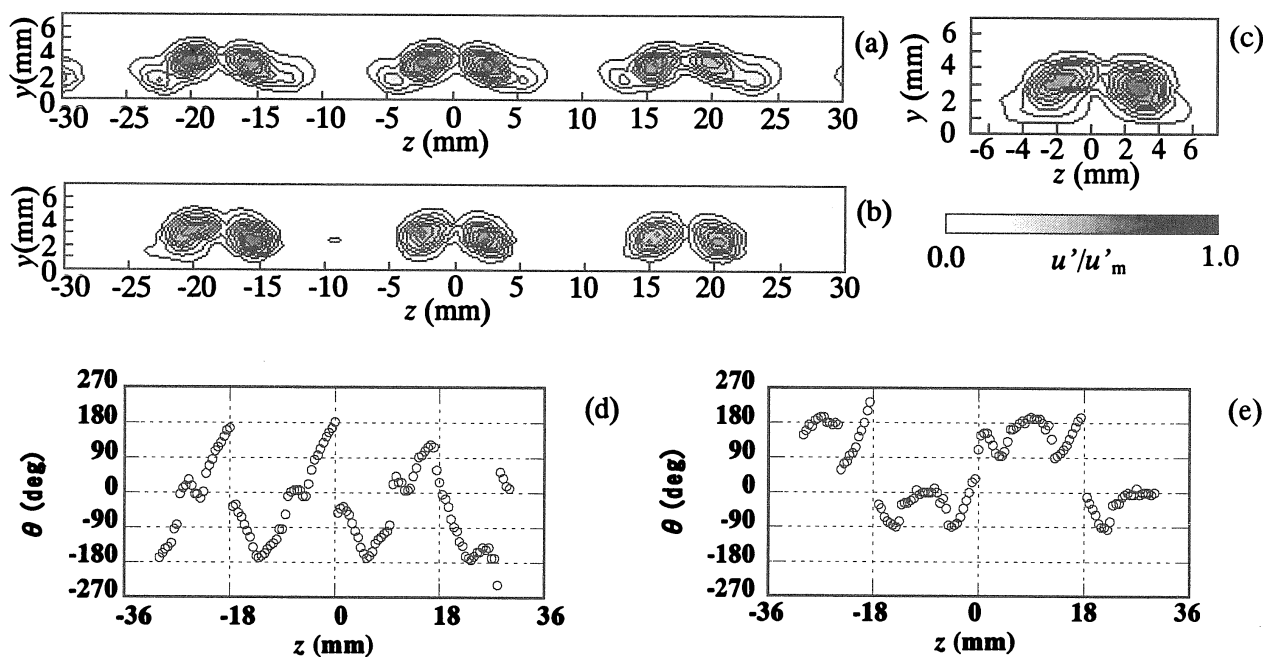


Fig. 5. Amplitude distributions of sinuous modes in y - z plane at $x-x_0=60\text{mm}$ for the streaks with $\lambda=18\text{mm}$. (a); fundamental mode, (b); subharmonic mode, (c); single streak, (d) and (e); phase distributions of fundamental and subharmonic modes at $x-x_0=60\text{mm}$, $y=3\text{mm}$ respectively.

ストリーク間隔がストリーク幅（網片幅）の3倍の $\lambda=18\text{mm}$ の場合には緩やかな増幅を示すものの、より狭い間隔の $\lambda=12\text{mm}$ の場合においては、どの周波数に対しても増幅が確認できなかった。

4. まとめ

本研究では、層流境界層中に人工的に低速ストリーク列を作り出し、その不安定特性を調べ、単一低速ストリークの場合の結果と比較した。

周期ストリーク列では、Varicoseモードは、単一ストリークに比べてその増幅が弱められ、最大増幅を示す周波数も低周波側（長波長）に移行する。特に、ストリーク間隔と同波長の基本モード（Fundamental Mode）は増幅率の著しい低下が見られる。Sinuousモードに対しては、分調モード（Subharmonic Mode）は、単一の場合とほとんど増幅特性が変わらないが、基本モードは、ストリーク間隔の減少とともに増幅が弱くなり、ストリーク間隔とストリーク幅の比が2倍程度以下では増幅をしめさなかった。

引用文献

- 1) Jeong J, Hussain F, Schoppa W & Kim J: J. Fluid Mech. 332 (1997) 185-214.
- 2) Hamilton J.M, Kim J. and Waleffe F.: J. Fluid Mech. 287 (1995) 317-348.
- 3) Waleffe, F. & Kim, J.: Self-Sustaining Mechanisms of Wall Turbulence, Chapter 3 (1997) 309-332.

- 4) Itano T and Toh S.: J. Phys. Soc. Japan 70 (2001) 703-716.
 5) Matsubara M. and Alfredsson P.H.: J. Fluid Mech. 430 (2001) 149-168.
 6) Swearingen, J. D. and Blackwelder, R. F. J. Fluid Mech. 182 (1987) 255-290.
 7) Li, F. & Marik, M.R.: J. Fluid Mech. 297 (1995) 77-100.
 8) Asai M, Minagawa M. and Nishioka M.: J. Fluid Mech. 455 (2002) 289-314.
 9) Asai, M: NAL SP-48T (2000) 71-74.

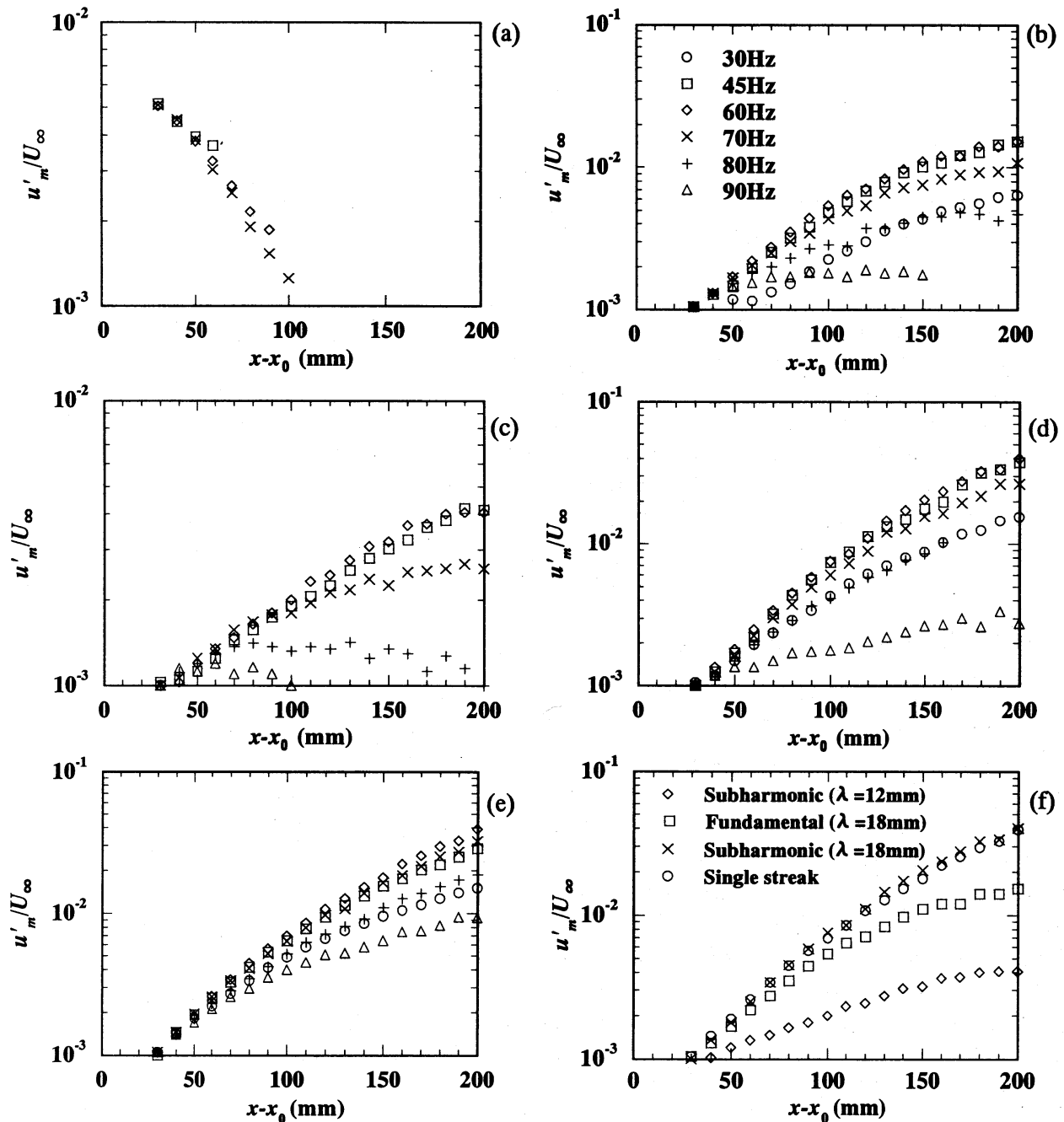


Fig. 6. Development of the sinuous modes. (a); fundamental mode for $\lambda = 12\text{mm}$. (b); subharmonic mode for $\lambda = 12\text{mm}$. (c); fundamental mode for $\lambda = 18\text{mm}$, (d); subharmonic mode for $\lambda = 18\text{mm}$, (e); single streak, (f); comparison of development of sinuous modes of 60Hz.