

剝離流の遷移領域における偶然化過程

東大宇宙研 佐藤 浩
高木正平

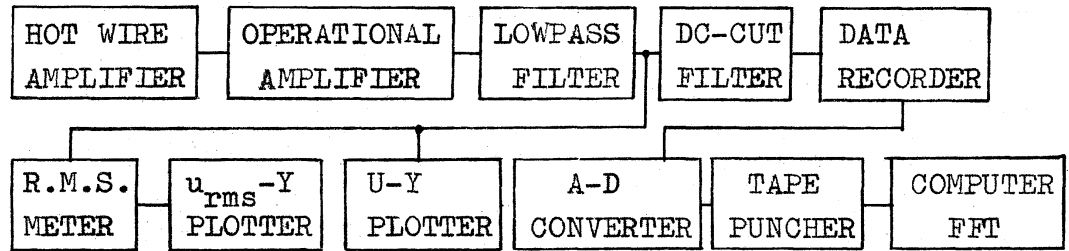
1. 序

近年、計算機の大型化と演算の高速化に伴って、情報のデジタル化による処理が盛んに行なわれるようになった。とくに、フーリエ変換は Cooley-Tukey⁽¹⁾ らに端を発する FFT (Fast Fourier Transform) algorithm によって、計算回数が短縮され、大量のデータ処理が可能となった。

一般に、層流から乱流の遷移過程の中で、最も問題とされるものは、regularな波形に Randomな(偶然性をもった)周波数成分がいかにかに生成されるかということである。ここでは、剝離流の実験データを基に、FFT によって計算された Power Spectrum を中心に、この偶然化過程を Randomness factor を定義して、議論する。

2. 実験装置およびデータ処理

Fig.1 に示してある様に、風洞の上流部にL字形のステップを置き、流れの一部は風洞の外へ吹き出し、一部は Blasius 形速度分布 (Fig.2を参照) が形成されて板の後端から層流剥離をする。 X-Y 座標は流れ方向に X, それに直角方向に Y 座標をとっている。 風速は 9.2 m/s にセットされている。 正弦的な速度変動を励起するために拡声器が風洞の下流に置かれてある。 風速の平均と変動は熱線風速計で測定された。 データ処理の BLOCK DIAGRAM を下に示す。



ここで用いた A-D 変換器はアナログ信号を自由なサンプリング間隔で、2000個のデータに変換できる。1つのスペクトルを求めるために、各々2000個のデータから計算されたスペクトルの5回の平均をとる。したがって、サンプリング間隔が 0.1 ms (すべてこの値にセットされている) であるから、処理されるものはアナログで $0.1 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^3 \times 5 = 1$ 秒に相当するデータである。FFTによって計算されたスペク

トルの周波数分解能はサンプリングしたデータの長さによって決定され、ここで求められたスペクトルの分解能は $\Delta f = 1/T = 1/0.2 = 5 \text{ Hz}$ である。較正用信号として、振幅と周波数のあらかじめわかった Sine 波を用いた。この結果からスペクトルの中の連続成分と line 成分を分離することができる。

3. 実験結果

3.1 流れ方向への平均風速分布と変動強度分布の変化

Fig.2, Fig.3 には、一様流 U_0 で無次元化された平均風速と速度変動の実効値が X をパラメータとして、プロットされている。Fig.2のY軸は Momentum thickness θ で無次元化してある。板の後端から剥離した $X = 10 \text{ mm}$ での風速分布は、Blasius 型分布とよく一致している。 $X = 40 \text{ mm} \sim 50 \text{ mm}$ での分布は、Lin によって計算された similar 解に近付き、それより X が大きくなるにつれて、 $U/U_0 > 0.5$ で一致をみなくなっている。Fig.4 に Momentum thickness θ がプロットされている。

3.2 流れ方向に領域の分類

Fig.4と、流れのいろいろな点における変動の波形 (Fig.5) から遷移過程を次の三領域に大別される。

(i) $X < 24 \text{ mm}$; 線形領域 (linear region)

この領域では、速度変動は正弦的 (sinusoidal) で、その周

波数や増幅度 (growth rate) は、線形理論とよい一致をみる。我々は、拡声器によって導入された周波数をもつものを基本成分 (primary component) と呼ぶことにする。

(ii) $24 \text{ mm} < X < 60 \text{ mm}$; 非線形領域 (nonlinear region)

この領域では、速度変動は基本成分の他にその高調波 (higher harmonics) 成分を含むようになるが、まだ周期性は残っている。一方この領域の下流になると、基本成分の半分の周波数 (今後、Subharmonics と呼ぶ) をもつ成分が生じてくる。

(iii) $X = 60 \text{ mm}$; 偶然化領域 (randomization region)

Subharmonic 成分の出現に伴って周期性のあった波形はくずれ始め、irregular 成分の増大をみ、偶然性 (Randomness) が増す。我々は、この偶然化領域での、Subharmonics と Randomness factor との関係を調べた。

3.3 $U/U_0 = 0.5$ の点におけるスペクトル

Fig. 6, 7, 8 および 9 は流れ方向 $X = 30, 50, 80$ および 130 mm におけるスペクトルを表わしている。Fig. 10 と 11 では、流れ方向 2 点でのスペクトルを比較してある。これらのスペクトルからうかがえることは、 $X = 60 \text{ mm}$ より下流から Subharmonic 成分が現われ始めている。また $X = 80 \text{ mm}$ では Subharmonic 成分の高調波も見受けられる。ところが Subharmonic 成分は非常に間欠的 (intermittent) であるために、サン

フォルしたデータの中に存在しない場合も生じ、たとえば $X = 70$ mm のスペクトルにはその成分はほとんど現われていない。Fig. 12と13には各基本成分とその高調波成分の流れ方向への変化がプロットされているけれども、上述した Subharmonic 成分の変化 (Fig. 13) は点がはらついてしまう。これは今後多くのデータ処理によって解決されるであろう。

3.4 $U/U_0 = 0.7$ の点におけるスペクトル

$U/U_0 = 0.7$ と $U/U_0 = 0.5$ における流れ方向へのスペクトルの変化は似ている。しかし、 $U/U_0 = 0.7$ の Subharmonic 成分の出現は $U/U_0 = 0.5$ より顕著である。Fig. 15と16についても同様である。平均回数の不足から、わずかなでこぼこの違いを議論することは意味がない。サンフォルしたデータの長さ0.2秒より長い間欠性をもつ領域での Subharmonic 成分の値は大きく変動するからである。

3.5 Excitation がある場合と Naturalな場合のスペクトルの比較

$X = 20$ mm と $X = 50$ mm における Excitation がある場合と Naturalな場合のスペクトルが、Fig. 17と18に示してある。風洞の中にあつた種々様々な周波数をもつた乱れは、線形領域で線形理論に従って選択され増幅される。音による励起がある場合のスペクトルは、Naturalな場合のスペクトルに、音の

周波数成分である line 成分を加え合せたスペクトルを形成していることがわかる。 Fig. 19には、 $X = 30 \text{ mm}$ と $X = 60 \text{ mm}$ での自然遷移の場合のスペクトルが図示してある。 $X = 60 \text{ mm}$ では明らかに Subharmonic 成分の出現がみられる。 Fig. 20に薄い平板の wake の遷移領域でのスペクトルが示めされている。 2つを比べると、線形領域で増幅されている成分の帯域が、wake のそれより広い。 このことは wake の遷移に比して、剝離流のそれが早くおこる原因になっている。

3.6 Subharmonics の間欠性

線形領域では低周波成分の増幅度は高周波成分のそれと比べると小さい。 Fig. 14にみられるように、40 Hz 近傍の低周波成分は、線形領域で増幅されたのではなくて、高周波成分の非線形干渉から生じたものと考えられる。 この事実を裏付ける実験は、wake について Sato⁽²⁾によって、剝離流について Miksad⁽³⁾によって、double sounds を使ってそれぞれ実証された。 しかし wake と剝離流の遷移過程で大きな差違がある。 それは平板の wake の中には、基本周波数成分の高調波は生じるが、剝離流にみられる様な、分周波 (Subharmonic 成分) は見い出せない。 剝離流は wake と違って低周波成分を生み出す機構をもっているといえる。 discrete な成分同志の interaction から continuous 成分は作られない。 ところが

Fig. 21にみられるように Subharmonics そのものが完全な discrete ではない。つまり Subharmonics の出現に伴って irregular 成分がもたらされると考えてもよいし、これは波形の上では、強い間欠性(原因は明確でない)によると考えてもよい。

4 Discussion

4.1 Randomness factor の定義

音による励起がある場のスペクトルは連続成分と line 成分に分離されることは4章で述べた。すると次の Randomness factor α が定義できる。

$$\alpha = \text{continuous energy} / \text{total energy}$$

ここに total energy とは、ある点での乱れの全エネルギーで、continuous energy は total energy から line 成分のエネルギーを引き去った残りである。 $\alpha = 0$ であれば完全層流であり、 $\alpha = 1$ であれば完全に発達した乱流であるといえる。 α の定義できる範囲は、 X が小さいとき line 成分が存在する領域に限られる。ここでは $X > 10 \text{ mm}$ としている。

4.2 Randomness factor の増化と Subharmonics の出現

Fig. 22に X と Randomness factor α の関係がプロットしてある。3.6にも述べた様に $X = 60 \text{ mm}$ の近辺で Subharmonics は強い間欠性をもっている。この出現と irregular 成分の発生と係り合いがあることも述べた。Fig. 13と16に見られる

ように $X > 60$ mm の領域において $u_{1/2f}$ と $u_{3/2f}$ 成分が増大する。

一方 Fig. 22 の同じ領域でも Randomness factor α の増大をみる。ひとたび Subharmonics ができると、基本成分との interaction で、Subharmonics が生じ、その Subharmonics が基本成分と interaction をくりかえす。このように Subharmonics の出現が強い間欠性を示さなくなる $X = 80$ mm では、 α の増化はゆるやかとなる。

6. 結論

以上の剝離流の実験から次の結論が導ける。

1. suppression 効果によって音による励起があるときの遷移は、ないときに比しておおくなる。
2. 音を入れないうちのスペクトルは連続成分だけで構成されている。
3. 線形領域において、励起があるときのスペクトルは、自然遷移のときの連続成分と音の line 成分によって構成されている。
4. Subharmonics の発生によって、Randomness factor は急激に増大する。

References

- (1) Cooley, J.W. & Tukey, J.W. "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series." Math. Comput., vol. 19, 1965, p. 297.
- (2) Sato, H. "An experimental study of nonlinear interaction of velocity fluctuations in the transition region of a two-dimensional wake." Jour. Fluid Mech., vol. 44, 1970, p. 741.
- (3) Miksad, R.W. "Experiments on nonlinear interactions in the transition of a free shear layer." Jour. Fluid Mech., vol. 59, 1973, p. 1.

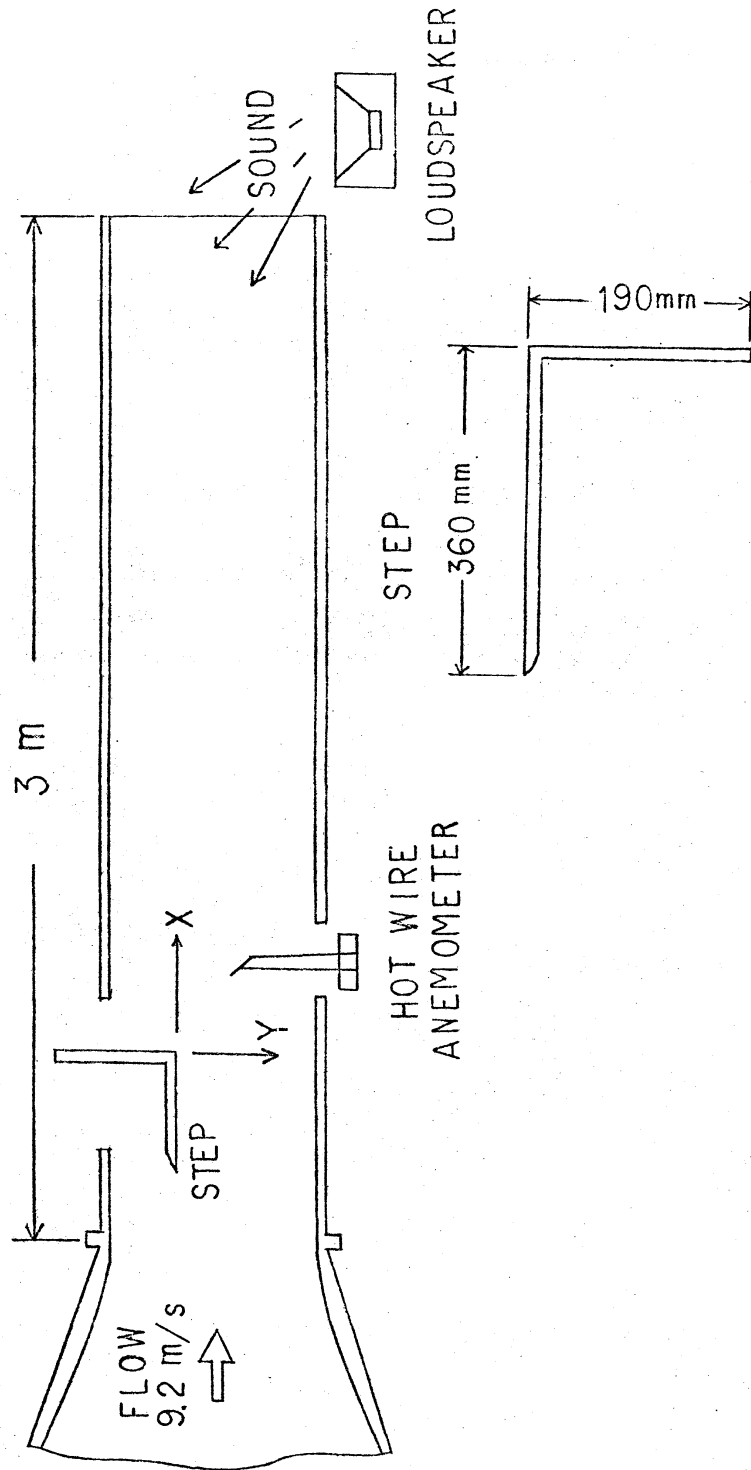


Figure 1. Sketch of test section

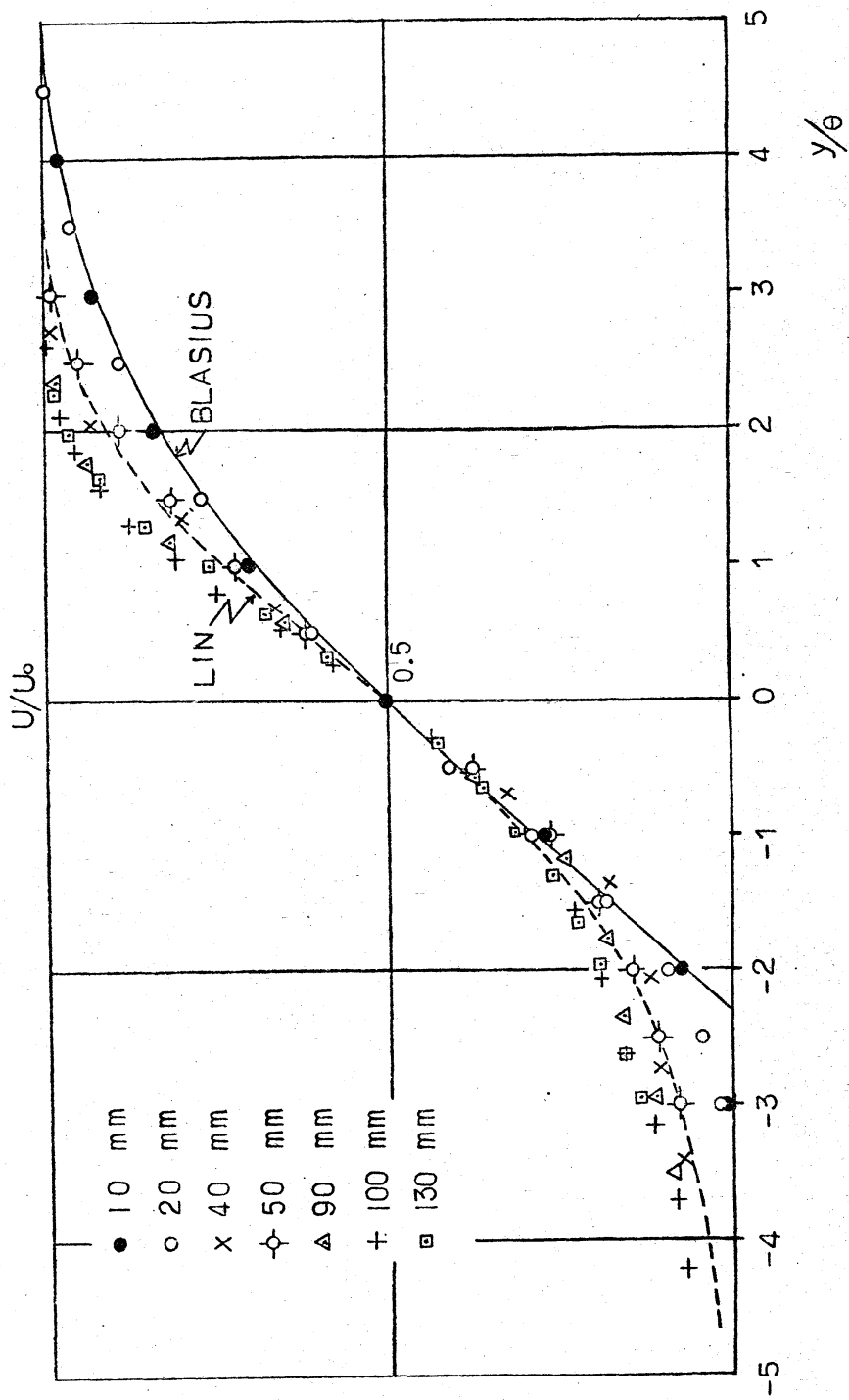


Figure 2. Non-dimensional plot of mean velocity distribution.

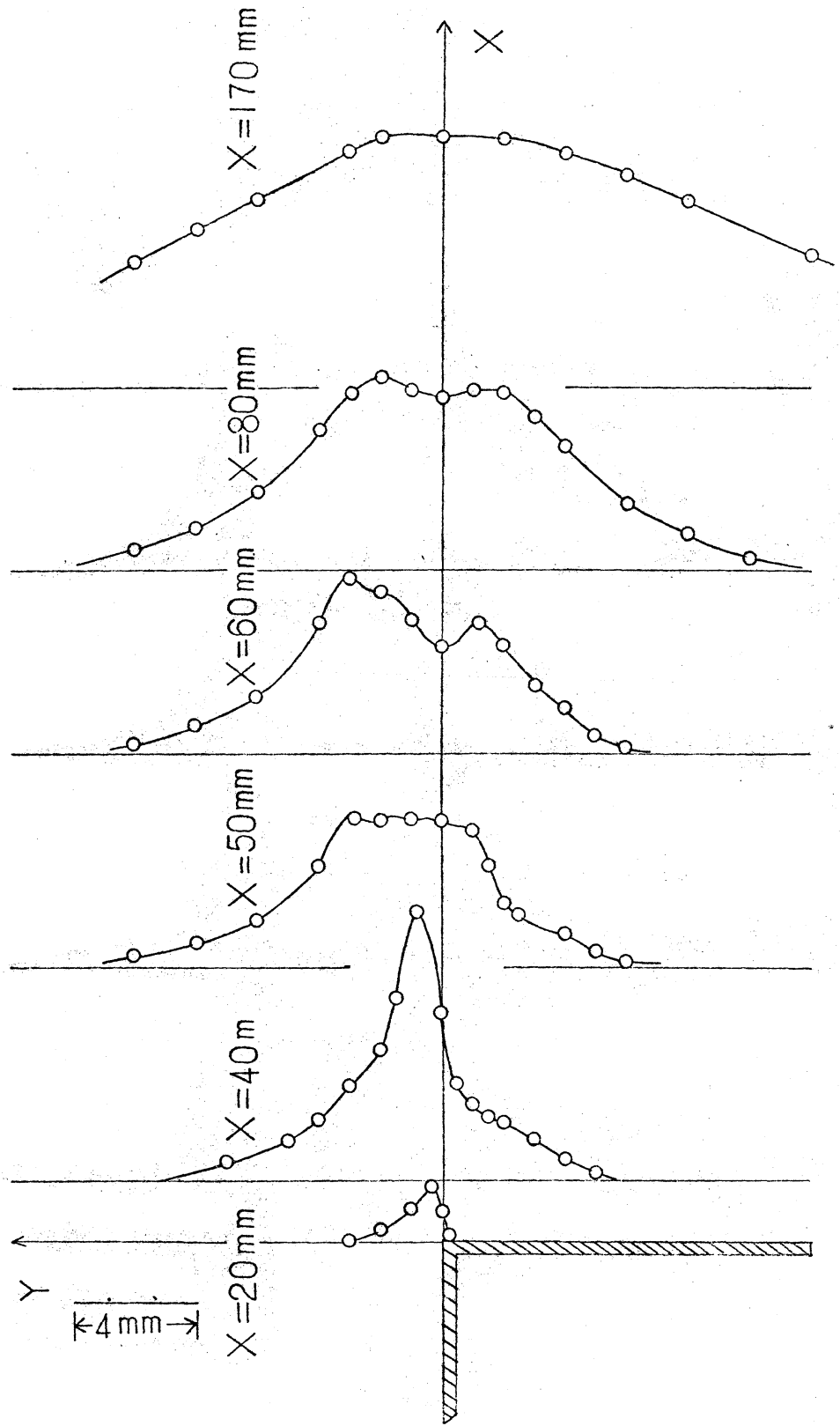


Figure 3. Distribution of R.M.S. values of velocity fluctuation

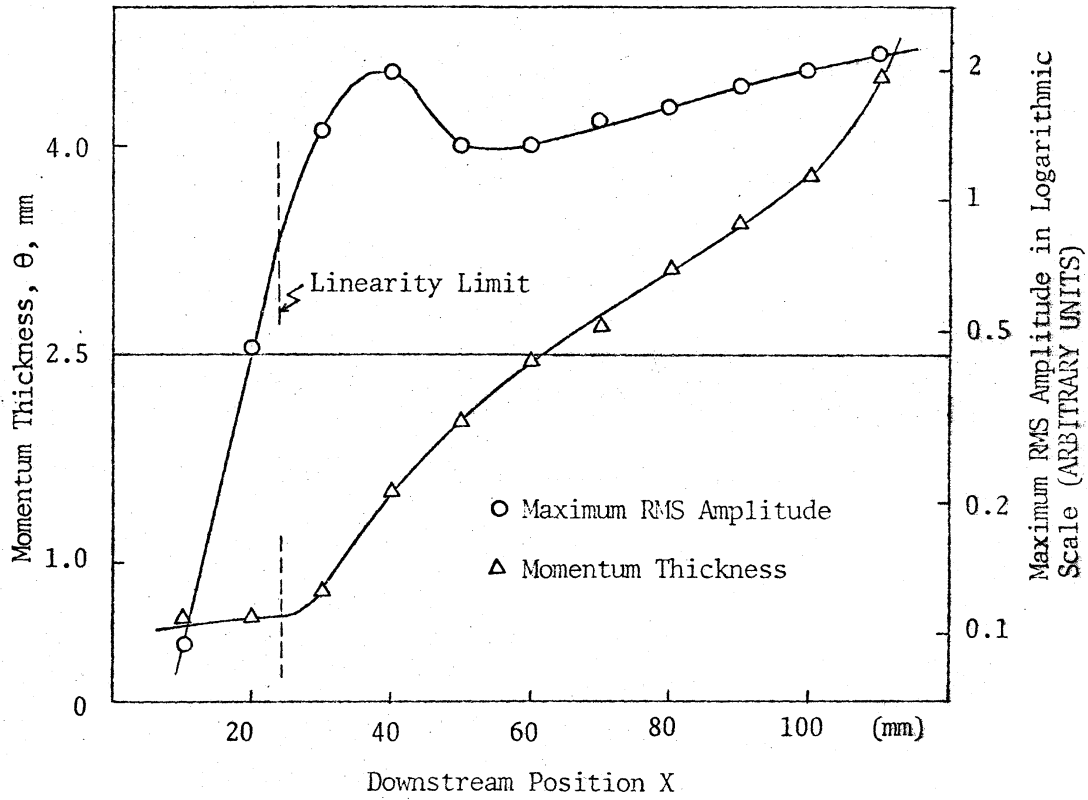
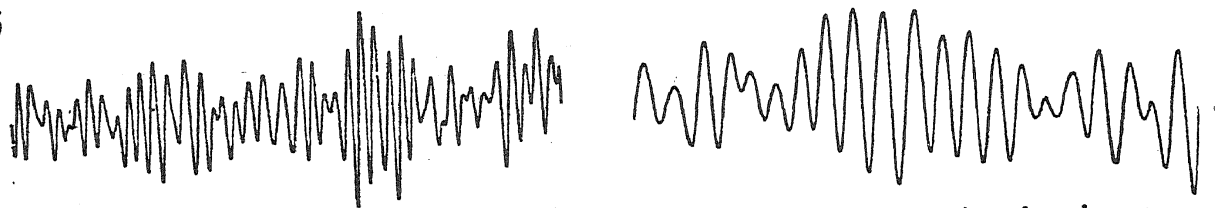
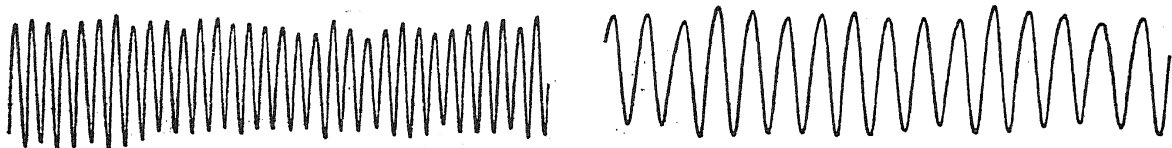


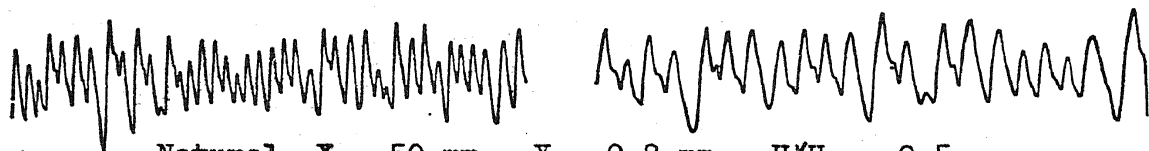
Figure 4.



Natural $X = 30 \text{ mm}$, $Y = 1.1 \text{ mm}$, $U/U_0 = 0.5$



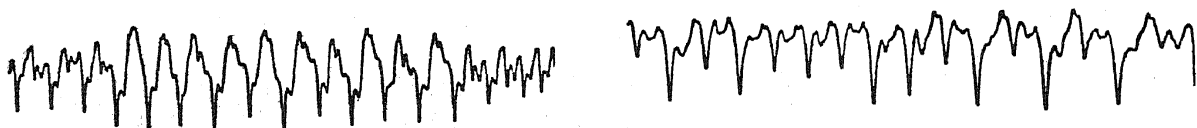
Excitation $X = 30 \text{ mm}$, $Y = 1.1 \text{ mm}$, $U/U_0 = 0.5$



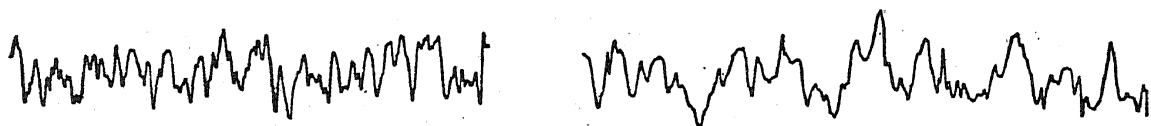
Natural $X = 50 \text{ mm}$, $Y = 0.8 \text{ mm}$, $U/U_0 = 0.5$



Excitation $X = 50 \text{ mm}$, $Y = 1.7 \text{ mm}$, $U/U_0 = 0.7$



Excitation $X = 80 \text{ mm}$, $Y = -0.8 \text{ mm}$, $U/U_0 = 0.5$



Excitation $X = 130 \text{ mm}$, $Y = -1 \text{ mm}$, $U/U_0 = 0.5$

Figure 5. Wave forms. Time interval between dots 0.01 sec.

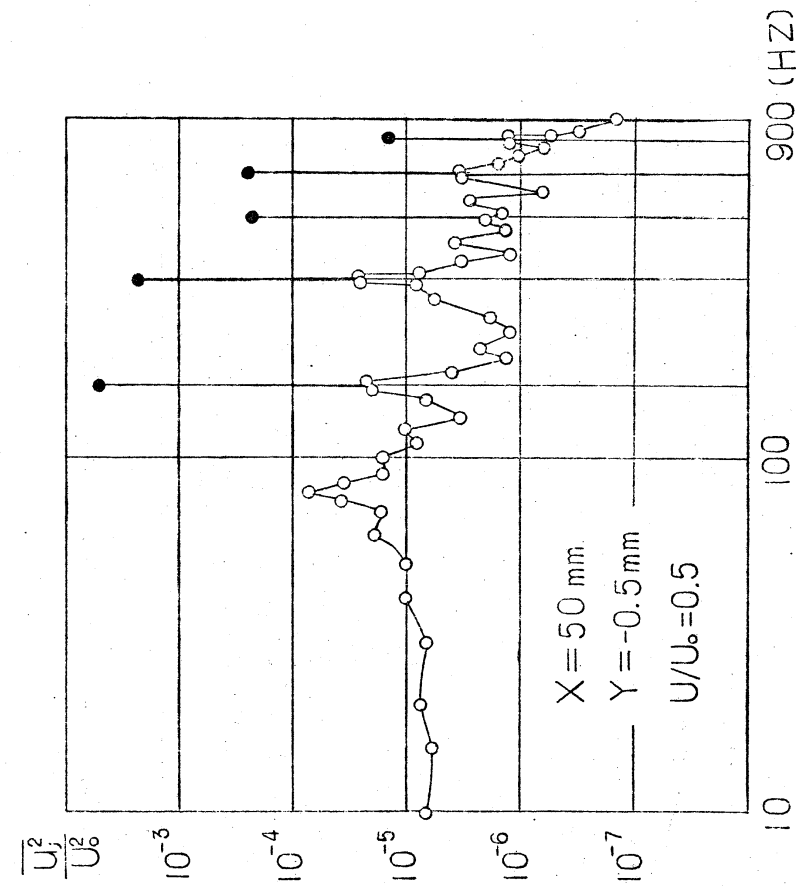


Figure 7. Frequency Spectrum with Excitation 160 Hz.

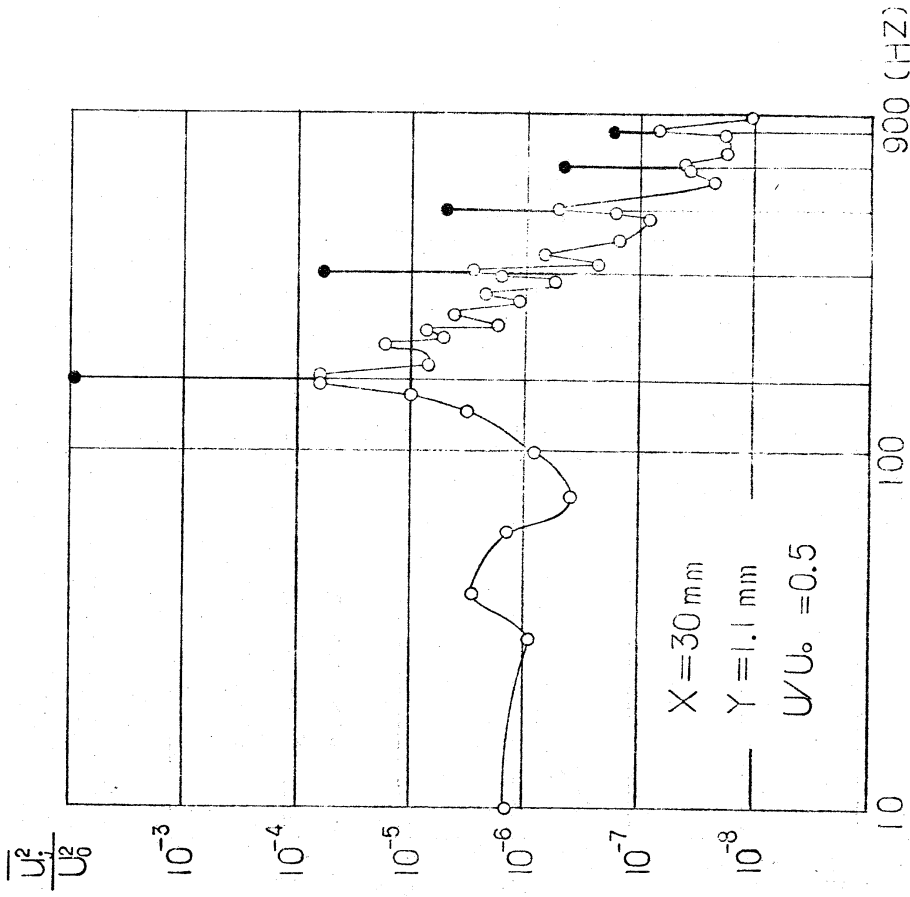


Figure 6. Frequency Spectrum with Excitation 160 Hz.

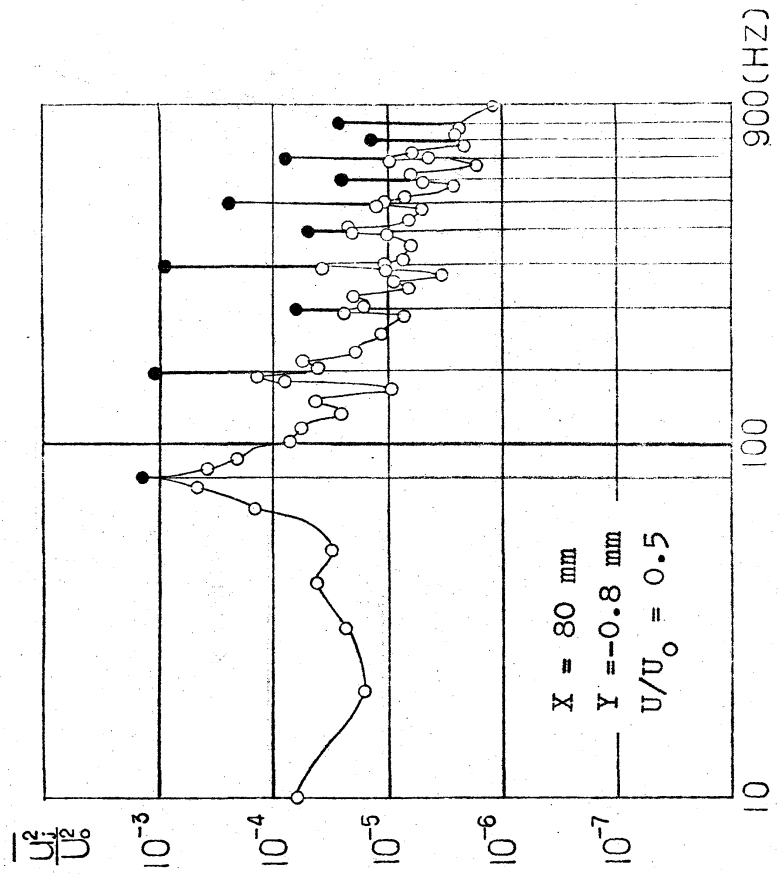


Figure 8 . Frequency Spectrum with Excitation 160 Hz.

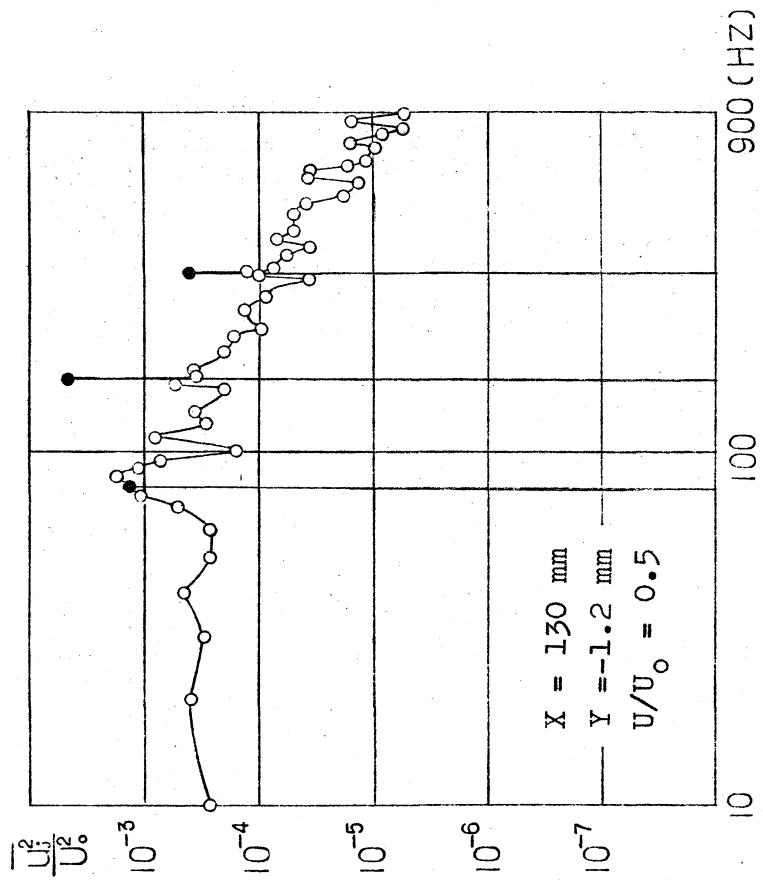


Figure 9 . Frequency Spectrum with Excitation 160 Hz.

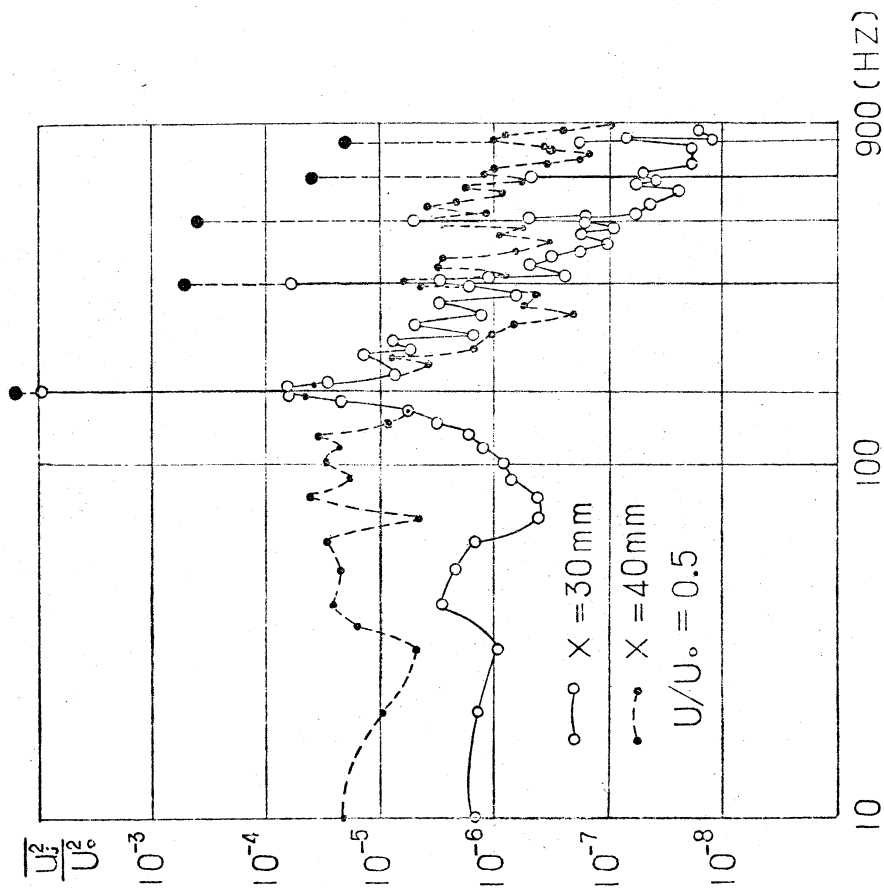


Figure 10. Comparison in between Frequency Spectra at $X = 30$ mm and 40 mm with Excitation.

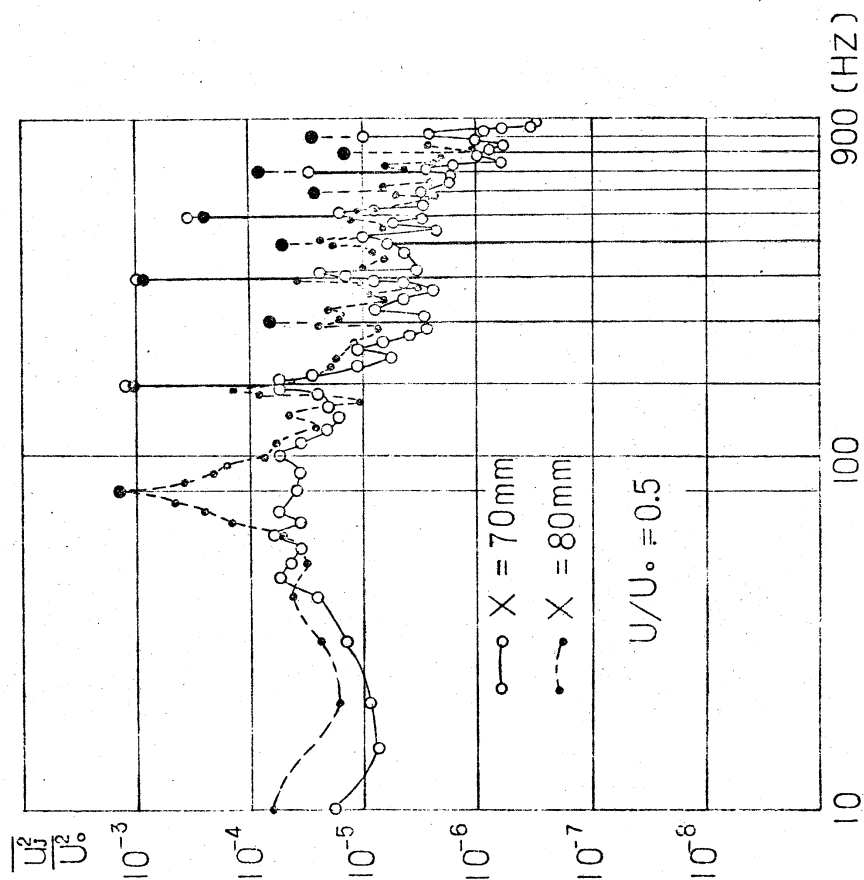


Figure 11. Comparison in between Frequency Spectra at $X = 70$ mm and 80 mm with Excitation.

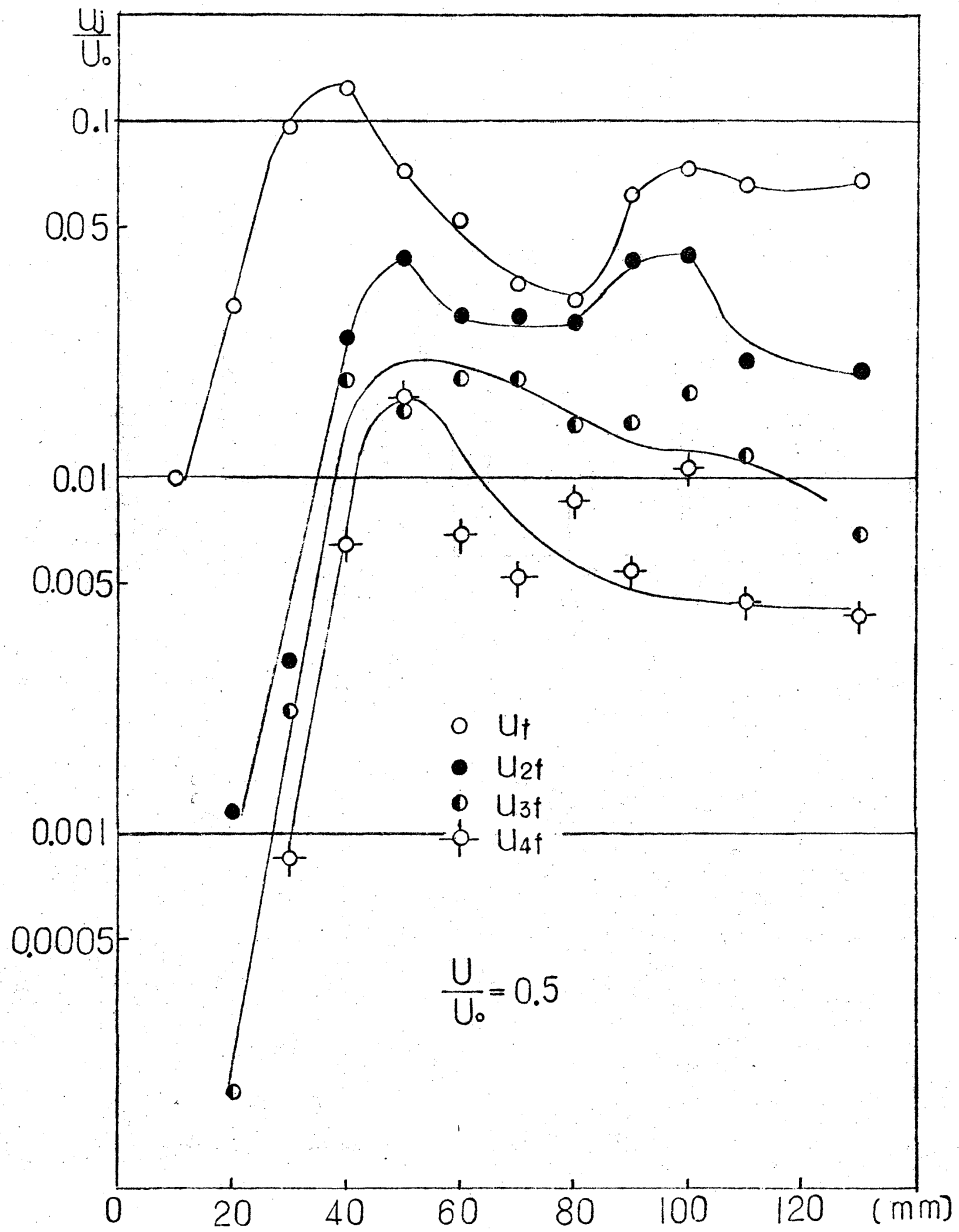


Figure 12. Normalized RMS Amplitudes of Various Spectral Components as a Function of Downstream Position with Excitation at the Position of the Velocity, $U/U_0 = 0.5$.

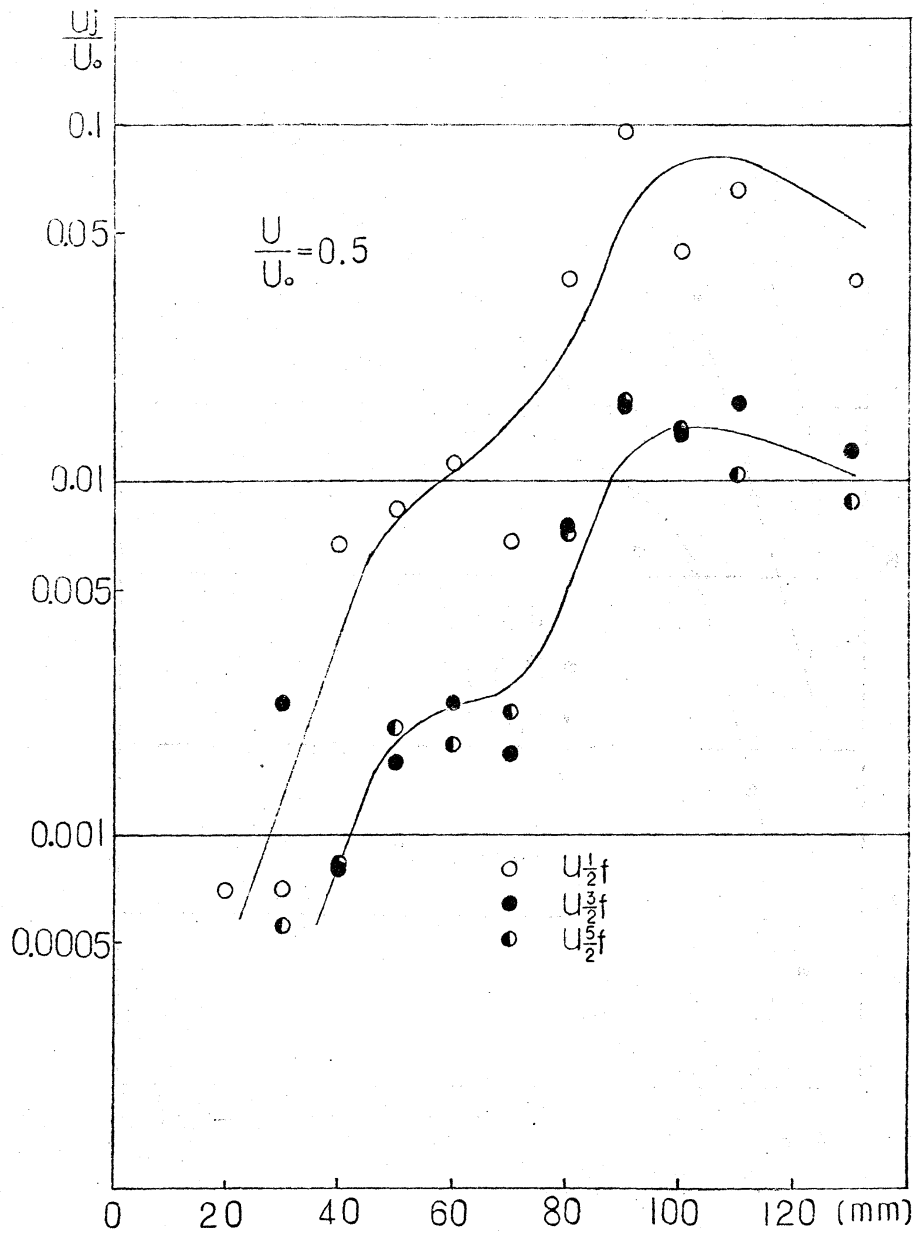


Figure 13. Normalized RMS Amplitudes of 1/2, 3/2 and 5/2 Harmonics of the Primary Oscillation as a Function of Downstream Position with Excitation at the Position of the Velocity, $U/U_o = 0.5$.

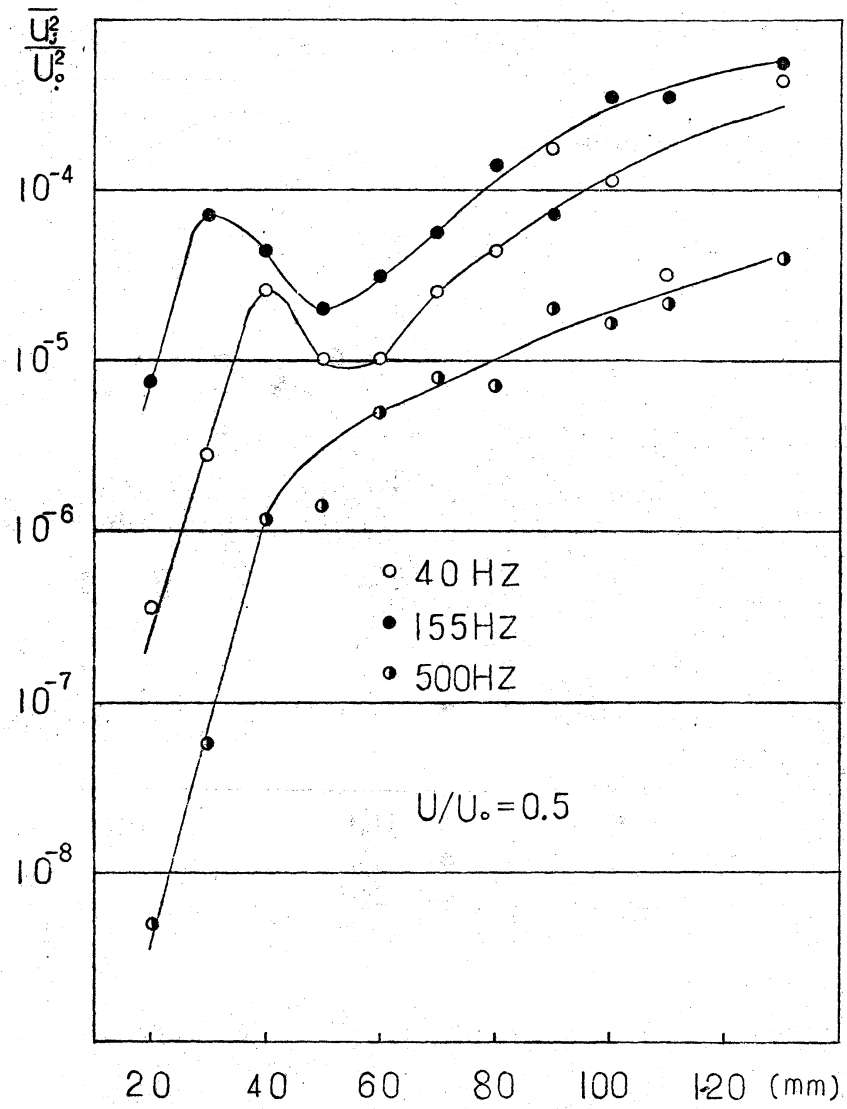


Figure 14. Spatial growth of continuous components

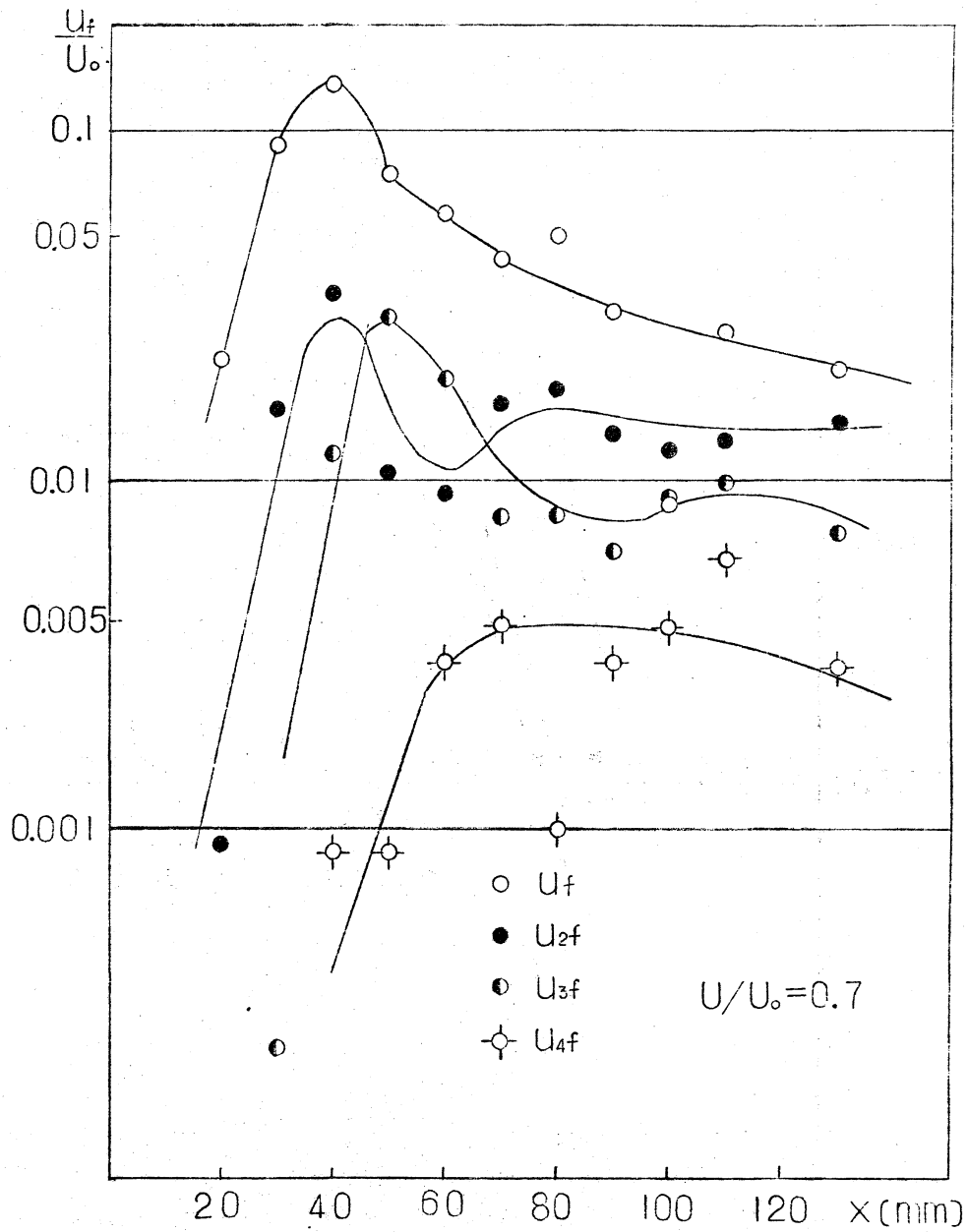


Figure 15. Normalized RMS Amplitudes of Various Spectral Components of the Primary and Harmonic Oscillations at the Location of the Velocity, $U/U_0 = 0.7$.

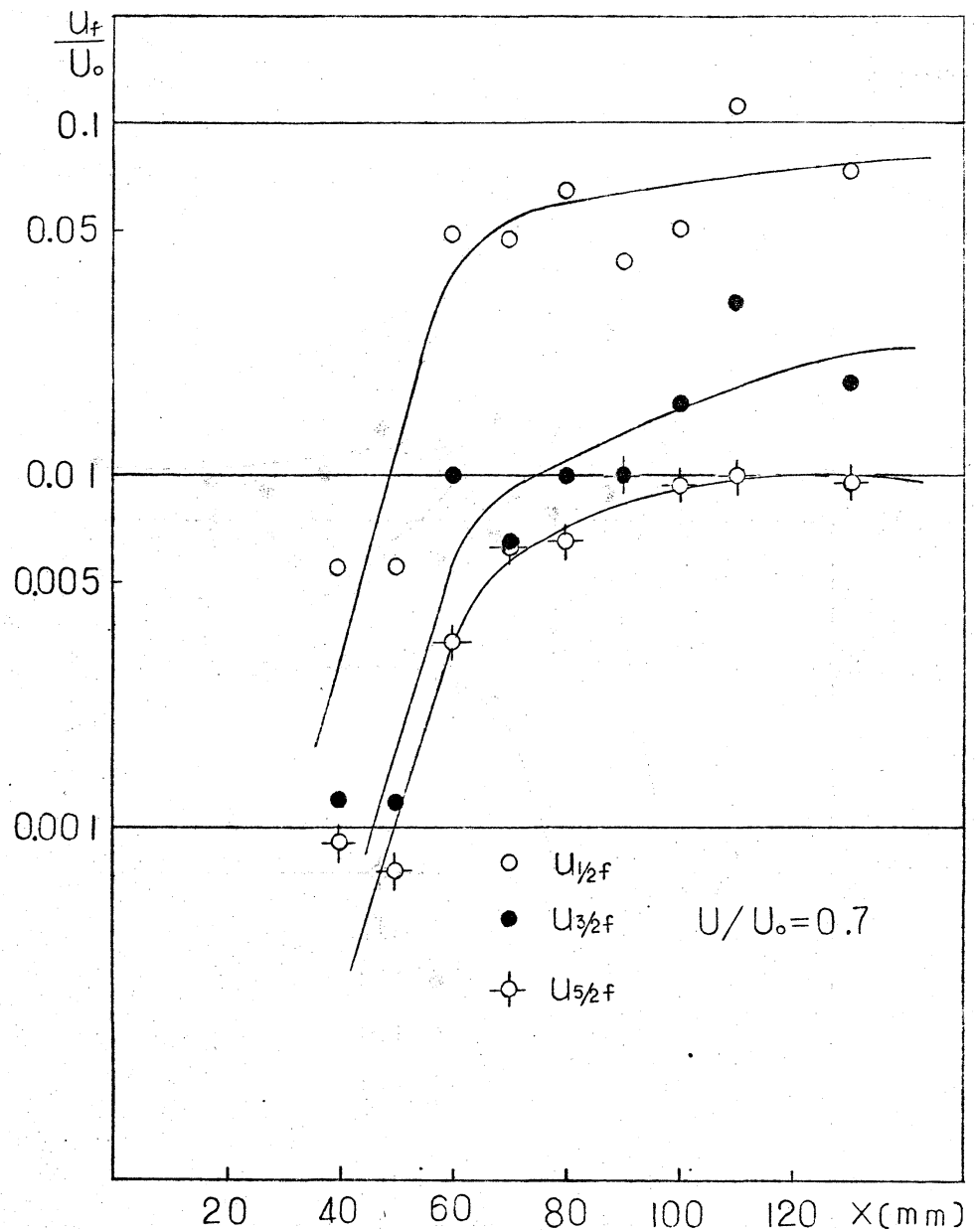


Figure 16. Normalized Rms Amplitudes of Various Spectral Components of Subharmonic and its Numerous Harmonic Oscillations at the Location of the Velocity, $U/U_0 = 0.7$.

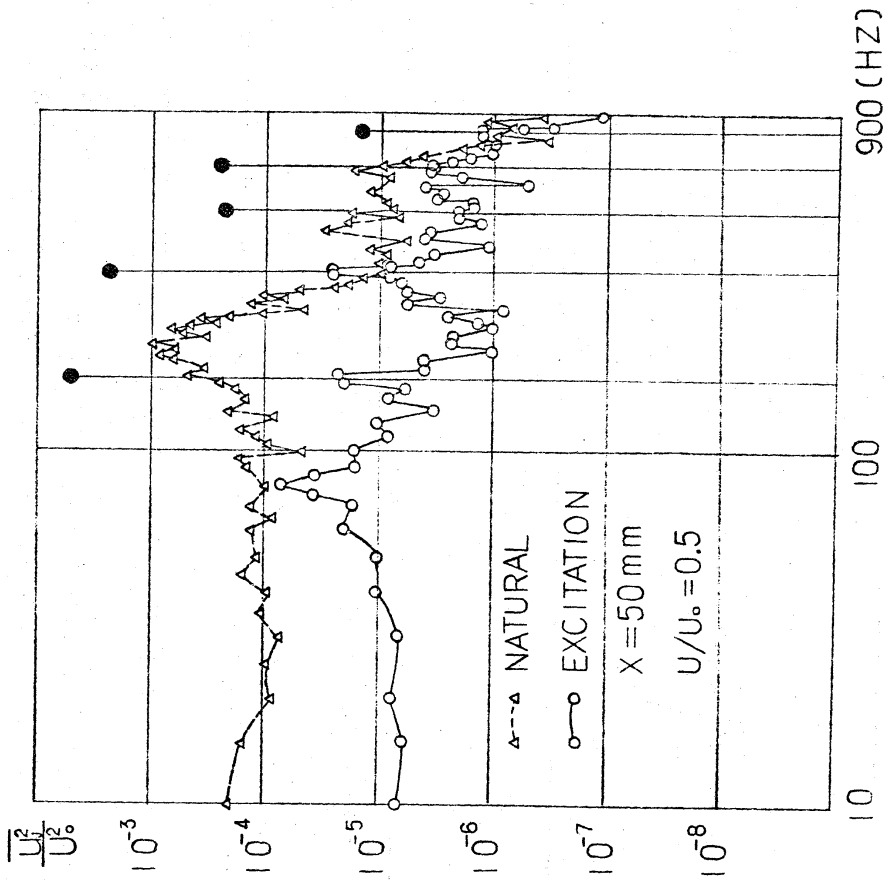


Figure 18. Frequency Spectra compared in the Case of with and without Excitation at X = 50 mm.

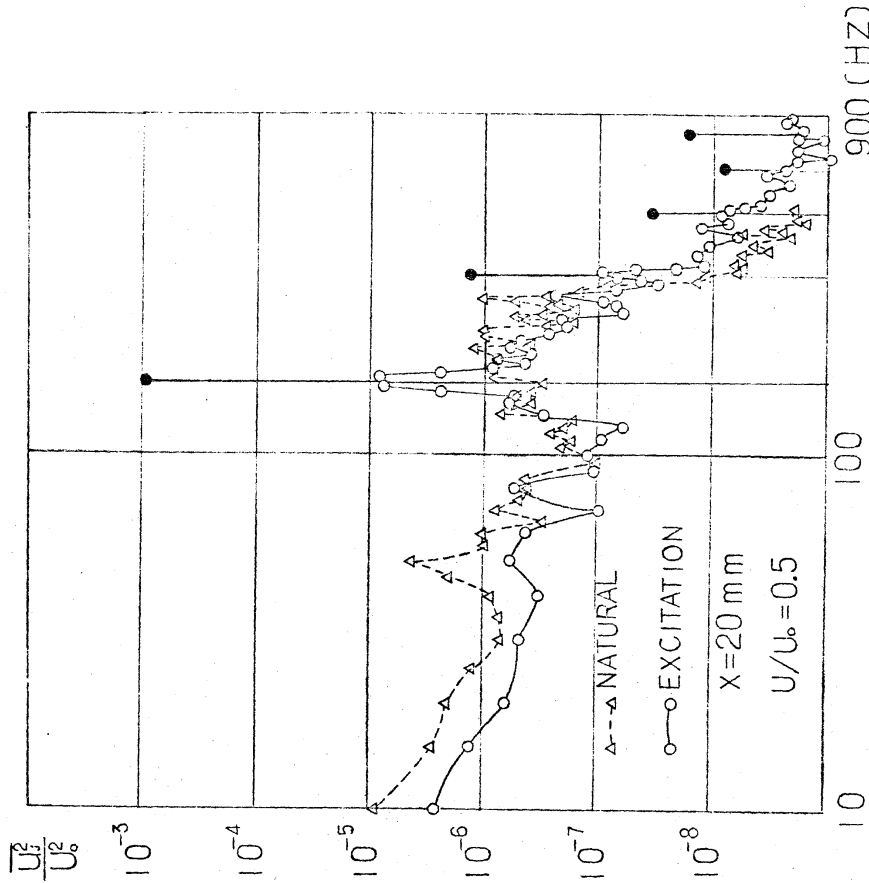


Figure 17. Frequency Spectra compared in the Case of with and without Excitation at X = 20 mm.

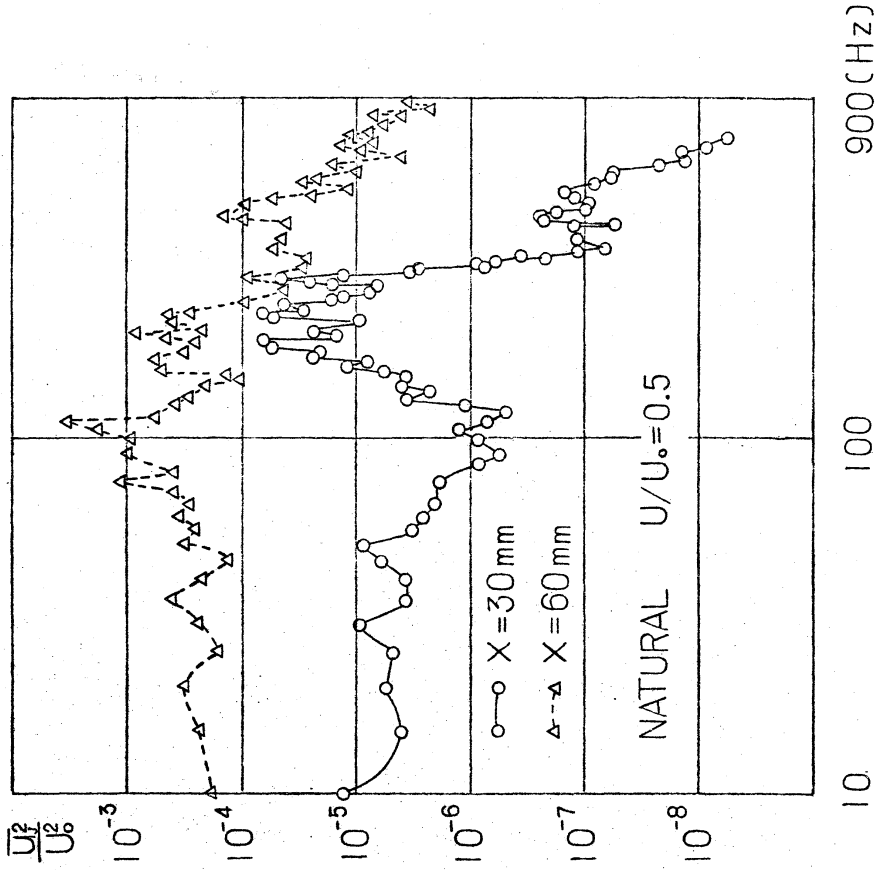


Figure 19. Frequency Spectra compared at between two Downstream Positions in Natural Transition.

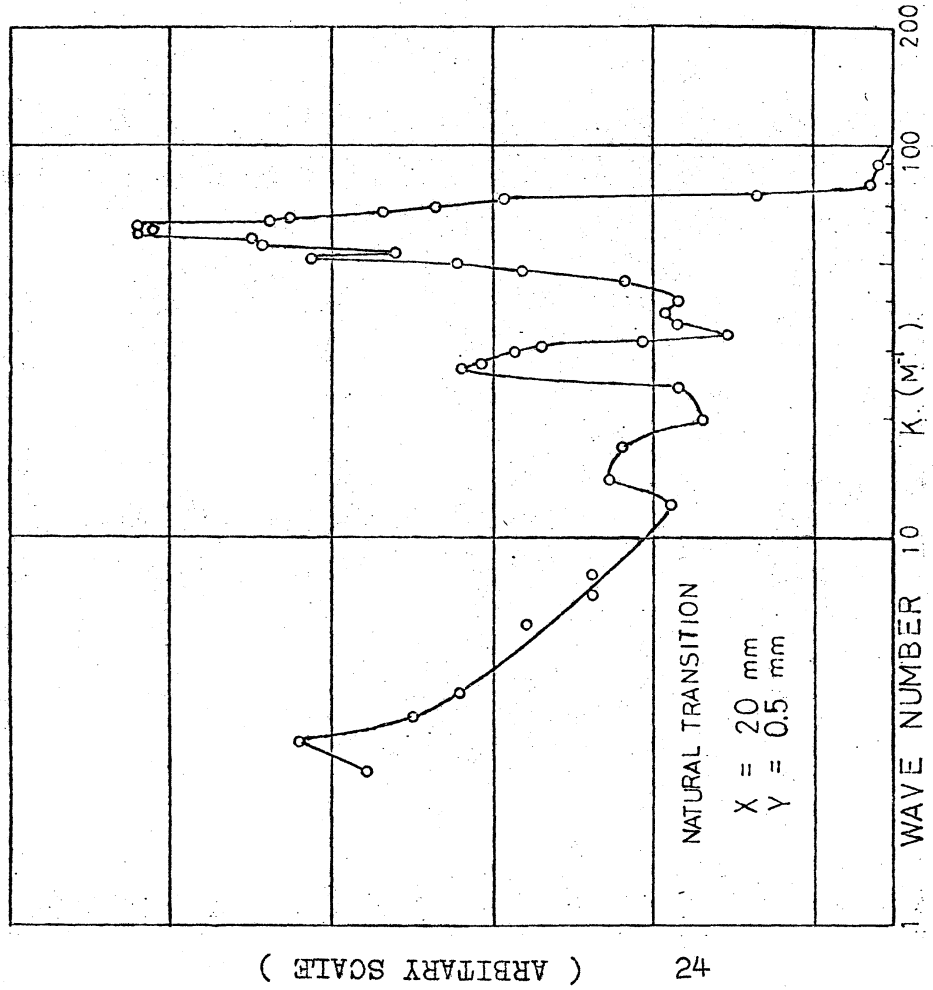


Figure 20. Energy spectrum of wake behind a thin flat plate in natural transition.

(ARBITRARY SCALE)

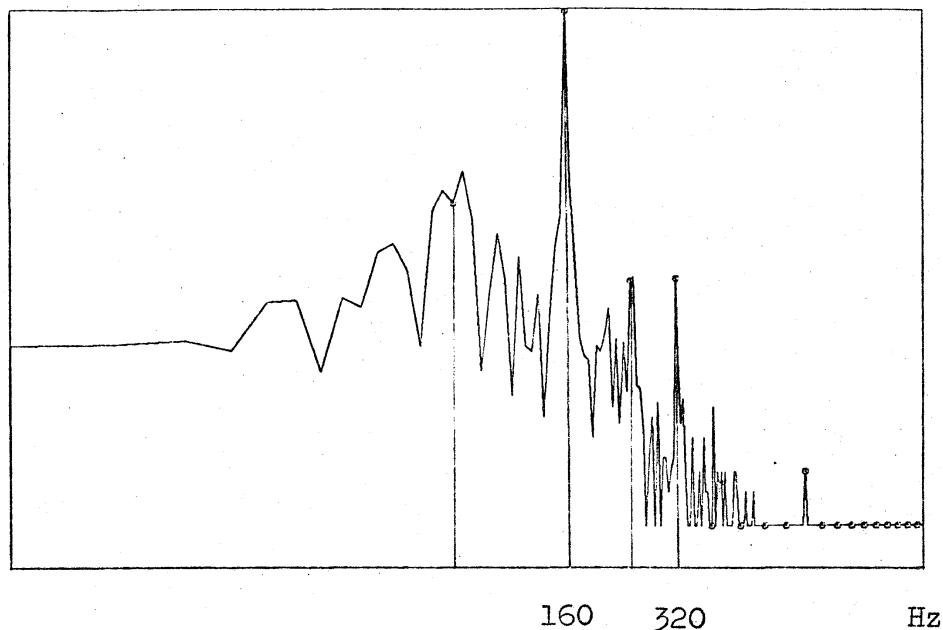


Figure 21. Instantaneous spectrum for 0.2 second at X = 90 mm, Y = 10 mm .

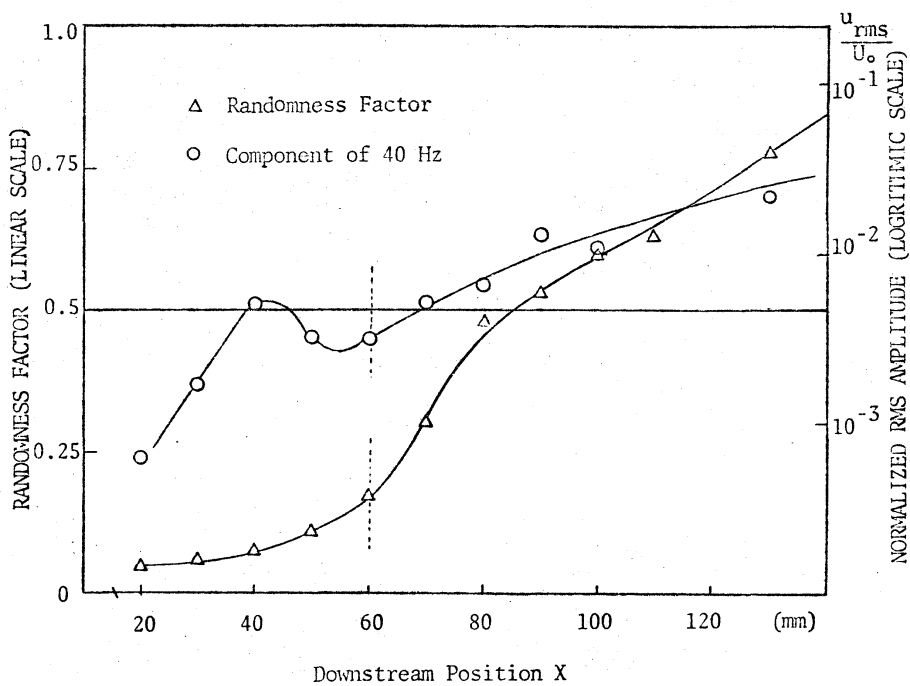


Figure 22. Randomness factor and Component of 40 Hz.