

スペクトル特性による振動乱流中の3次元組織的乱流構造の 発生・発達・減衰過程に関する研究

The Generation, Growth and Decay of Fluctuations Accompanying Large-Scale
Structure in a Reciprocating Oscillatory Flow
- Spectral Consideration -

孟 岩^{*}・日野幹雄^{**}

By Yan MENG and Mikio HINO

From the spectral point of view, the generation, growth and decay of fluctuations accompanying large-scale structure in an oscillatory turbulent flow are discussed analyzing the experimental data obtained by multiple-probe hot-wires. We found that fluctuations with structures are weak at the beginning of flow deceleration phase but grow rapidly, both in low and high frequencies range, with advance of the phase. These high frequency disturbances are generated at the positions where the high-shear layer appears. Fluctuations accompanied by turbulence structures near the wall get weaker and weaker with advance of the phase which could be account for by the reduction of the ensemble-averaged shear. The average height of the structure gets taller and taller during flow deceleration.

Keywords: large-scale structure, high-frequency disturbances, high-shear layer, spectrum, oscillatory flow

1. はじめに

近年、乱流境界層における3次元組織的乱流構造についての研究が盛んに行われ、3次元組織的乱流構造の特徴及びそれが乱れエネルギー生成に大きく寄与していることなどが次第に明らかになっている。しかし、この3次元組織的乱流構造がどのように発生・発達・減衰していくのかは依然として分かっていない。3次元組織的乱流構造の発生・発達・減衰過程を明らかにすることは乱流現象の解明への一つの鍵となっている。一方、交番振動乱流の減速期に壁面付近に生じる乱れが3次元組織的乱流構造によるものであることはすでに我々の研究によって明らかになってきた¹⁾²⁾。この3次元構造のアンサンブル平均像は一對の渦の形をなしており、また、その形は位相の進みと共に徐々に変化していることも分かった³⁾。更に、この3次元構造は減速期の初期に発生し、そして位相の進みと共に成長し、その後また減衰していくことは熱線風速計の多点同時測定によって明らかになった⁴⁾。振動乱流の場合、3次元構造の位相変化を調べるのは3次元構造の発生・発達・減衰を見ているとも言える。そこで、本研究では各位相の3次元構造に伴う速度変動を調べ、3次元組織的乱流構造の発生・発達・減衰過程のスペクトル特性を明らかにすることを目的とした。

* 学生会員 東京工業大学大学院 工学部土木工学科
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

2. 実験装置及び測定方法

2-1 風洞

振動流風洞は図-1に示したように幅26 cm、深さ d が10 cmの矩形断面を持ち長さ1.4 mの亚克力製風路である。一端でピストンをモータで駆動することにより交番振動流が作られる。壁面に鉛直方向はY軸

で、スパン方向はZ軸で、ピストンの運動方向をX軸にする。本研究の実験条件は参考文献1と同じように設定した。

2-2 流速の計測

測定は自作の定温度方式X型プローブの熱線風速計で行い、熱線の出力はレーザー・ドップラー流速計を用いて、キャリブレーションした。本研究で用いたA/D変換器は最大24チャンネルの信号を同時刻にサンプリングでき、周波数1 KHzで使用した。変動成分をA/D変換する時生じるエイリアジングを緩和するために熱線信号を予めアナログローパスフィルタ(遮断周波数0.5 KHz)に通して取り込んでいる。図-2は実験装置の配置図である。6本のX型熱線プローブからなるレイクは壁面から5 mmを離れるところに設置し、下から2番目のプローブはdetector probeとして使用し、大きいレイノルズ応力のピークを検出した時に、検出点の前後それぞれ64個ずつのデータを収集する。

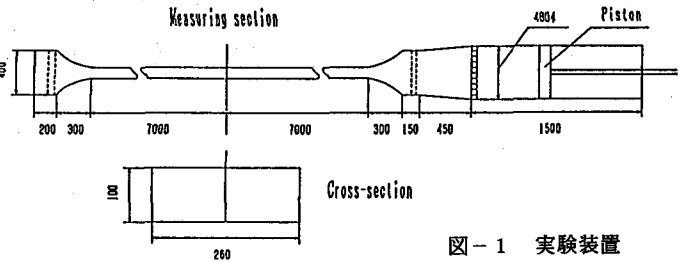


図-1 実験装置

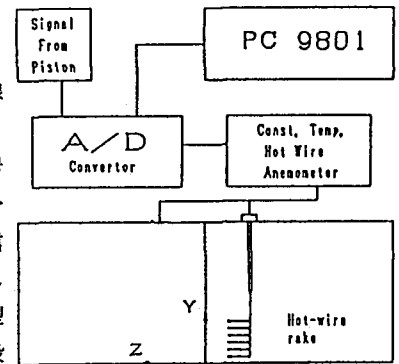


図-2 測定装置の配置図

3. 実験結果及び考察

3-1 3次元構造の発生・発達・減衰過程

乱流中の3次元構造を捕まえるために、一般には条件付抽出法という方法を用いる。具体的には一本のX型熱線プローブをdetector probeとして用いて、そこで発生したレイノルズ応力のピークがある値を超えた時の速度変動を調べる。

振動乱流の場合には加速期に大きい速度変動が存在しているにもかかわらず、高いレイノルズ応力のピークがほとんど現れない。すなわち、乱れエネルギー生成に大きく寄与する3次元構造が存在しない。振動乱流中の3次元構造が減速期の初期に発生し、その後、位相の進みと共に成長し、遅い位相にまた減衰していく。

図-3は3次元組織的乱流構造の発生・発達・減衰過程を示している概念図である。上の図は $Y/d=0.1$ の高さでの主流の位相変化を示している。下の図は流れ方向に異なる位置に置かれたプローブを示しており、また、上流側($X/d=0.0$)のプローブで見つけた3次元構造は下流方向に流され、もう一度下流側に設置されたプ

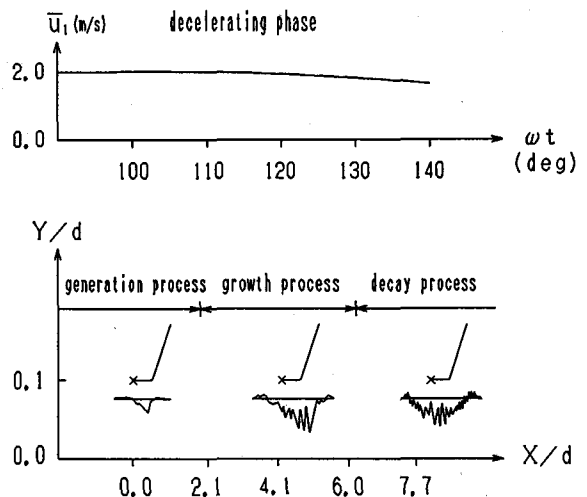


図-3 減速期における3次元構造に伴う乱れの発生・発達・減衰過程

ロープで見つける時の速度変動の変化を示している。我々の今までの研究によれば、3次元構造は主流とはほぼ同じ速度で移動しており、位相100度の時に、 $X/d=0.0$ のところに見つけた構造は位相120度の時に $X/d=4.1$ の所でもう一度見つけることができ、また、位相140度の時に、 $X/d=7.7$ のところでもう一度捕まえることができる。すなわち、3次元構造の位相変化を調べるのは3次元構造の発生・発達・減衰過程を見ているとも言える。

3・2 3次元構造に伴う瞬間速度変動 u の位相変化

図-4は各位相でのそれぞれの高さの瞬間速度変動 u を示している。これらの図を見て分かるように、早い位相すなわち発生過程に見つけた3次元構造に伴う瞬間速度変動の空間相関は狭く、壁面の近くに留まっている。位相が進むと、3次元構造に伴う速度変動の空間相関は広くなり、位相が更に進むと、3次元構造に伴う速度変動は壁面から

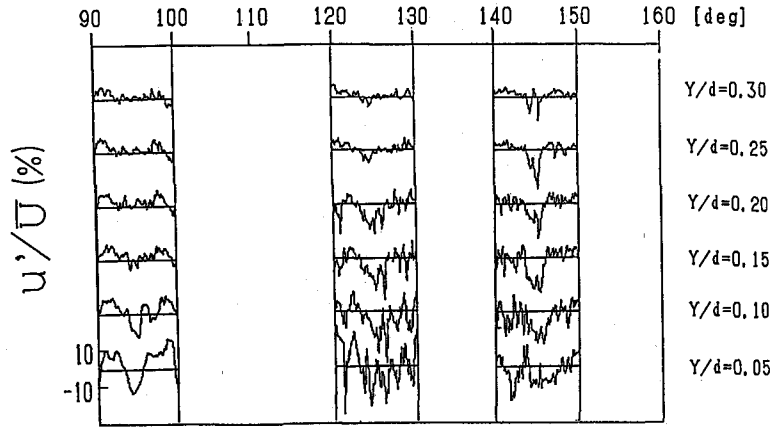


図-4 各高さにおける瞬間速度変動 u の位相変化

かなり離れた所まで強い空間相関を持っていることが分かる。また、高さ $Y/d=0.1$ のところの各位相での速度変動 u を比べて見れば分かるように、早い位相では3次元構造に伴う瞬間速度変動が弱く、位相が進むと、3次元構造に伴う速度変動が強くなり、位相が更に進むと、3次元構造に伴う速度変動はまた弱くなる。速度変動の波形を見ると、早い位相に3次元構造に伴う速度変動の波形にはほとんど高周波成分の乱れが乗っていないのとは逆に遅い位相になると強い乱れが乗っていたことが分かる。

しかし、流れが乱流になった場合、速度場が繰り返し出現することは期待できなくなり、各位相から一つずつ挙げた例を比べて議論することはほとんど無意味である。以上の議論に一般性をもたらすために、本研究では各位相にそれぞれ64個の3次元構造を捕まえて位相別に64個のデータセットを解析した。一つのデータセットに128個のデータがあり、総データ数は8192点(64*128)である。また、パワースペクトルの計算やフィルタ処理は高速フーリエ変換(FFT)を用いて行っている。データ数の少ない場合、FFTによる正確なスペクトルの推定は不可能なので、本研究では一度に8192個を用いてパワースペクトルを求めた。図-5はその一つの例を示している。見やすくするために、64個のデータセットの内の8セットのデータしか示していない。

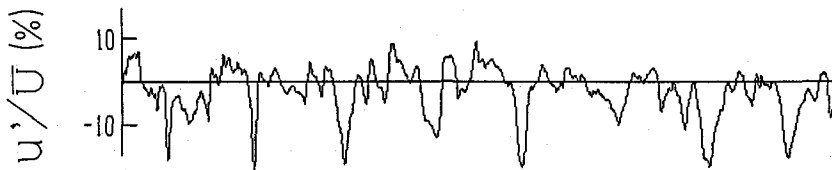


図-5 3次元構造に伴う速度変動のなま波形(位相90度-100度、 $Y/d=0.1$)

3・3 3次元構造に伴う速度変動 u のスペクトル特性

図-6(a)-(f)は位相90度から100度までの間に捕まえた3次元構造に伴う速度変動 u のパワースペクトルを示している。これらの図を見て分かるように、3次元構造に伴う速度変動 u のスペクトルは乱流

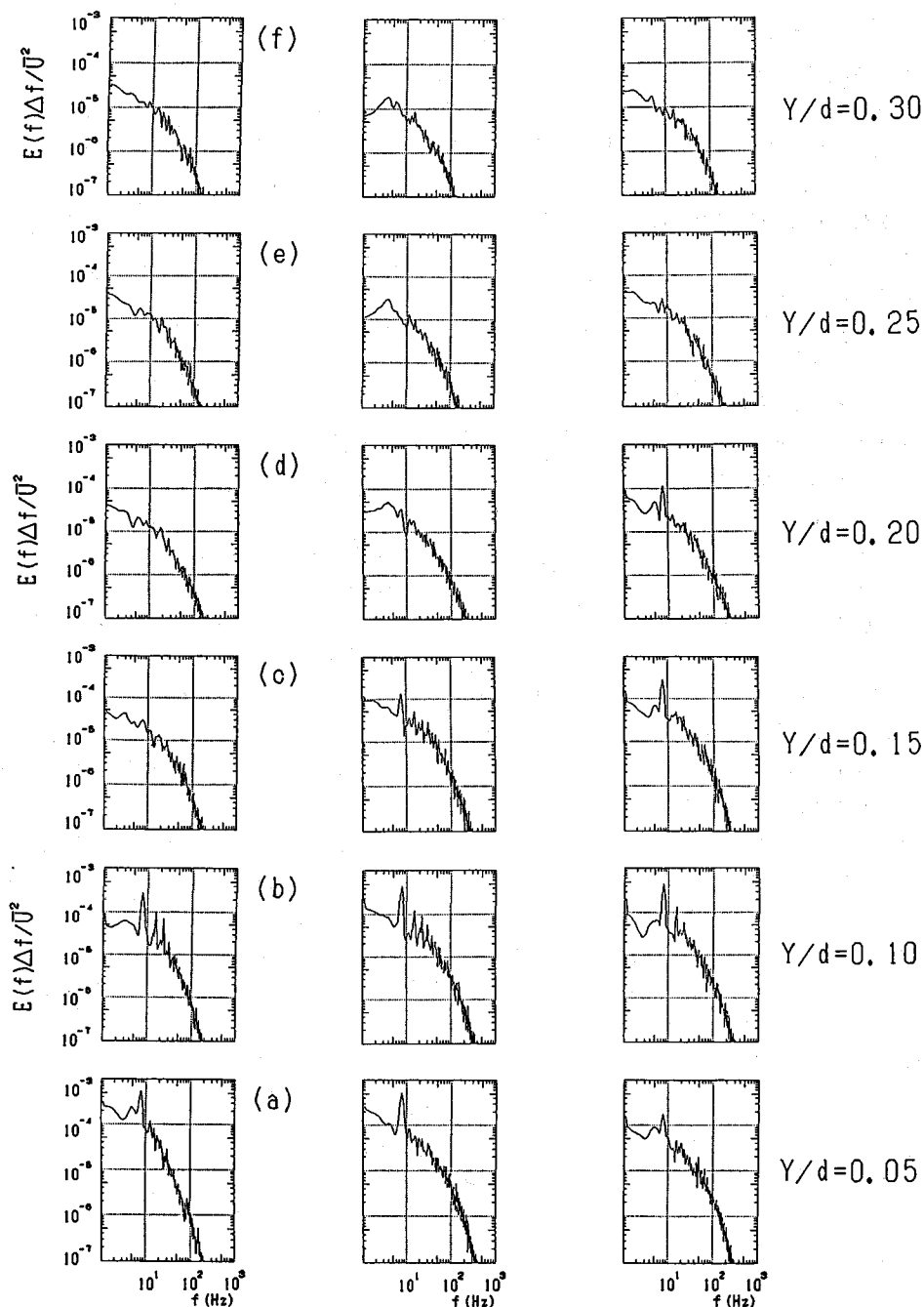


図-6 3次元構造に伴う速度変動の
各高さでのパワースペクトル
(位相90度-100度)

図-7 3次元構造に伴う速度変動の
各高さでのパワースペクトル
(位相120度-130度)

図-8 3次元構造に伴う速度変動の
各高さでのパワースペクトル
(位相140度-150度)

型の連続スペクトルとなっている。図-6の(a)と(b)はそれぞれ壁から5mm、10mm ($Y/d=0.05$ 、0.1)を離れた所での速度変動 u のパワースペクトルを示しており、周波数 $f=7$ 、8の近くに明確なピークが現れていることが分かる。壁面から10mm以上($Y/d=0.1$)離れると、明確なピークが現れてこなくなる。図-7(a)-(f)は位相120度から130度までの間に捕まえた3次元構造に伴う速度変動 u のバ

ワースペクトルを示しており、図-6と比べれば分かるように、壁面から15 mm ($Y/d=0.15$) 離れたところでも明確なピークが確認でき、3次元構造 Y (mm)

造が高くなった様子が捕らえた(図-6 (c))。図-8(a)-(f)は位相140度から150度までの間に捕らえた3次元構造に伴う速度変動 u のパワースペクトルを示しており、パワースペクトルのピークが壁から20 mm ($Y/d=0.2$) 離れた所でも、はっきり見える(図-8 (d))。減速初期に見つけた3次元構造は低く、位相の進みと共に、3次元構造が高くなり、位相が

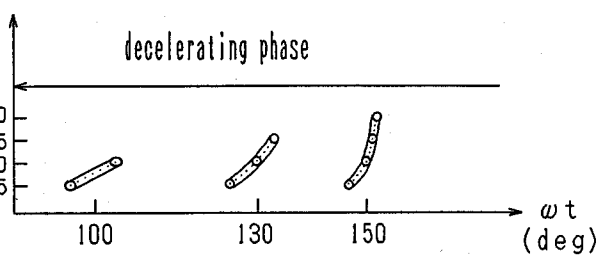


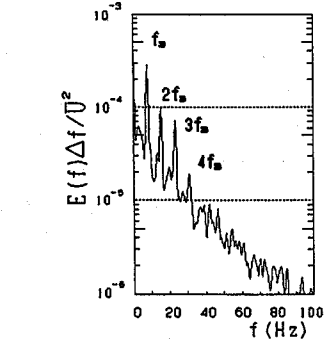
図-9 3次元構造に伴う速度変動の高さ方向の成長

更に進むと、3次元構造が更に高くなったことが分かる。以上の結果をまとめたのが図-9である。3次元構造に伴う速度変動の高さ方向の成長ははっきり分かる。

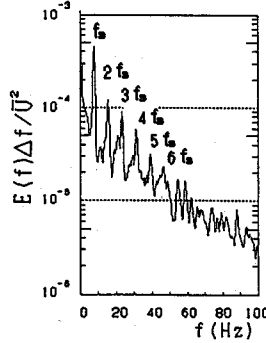
図-10はパワースペクトルのピーク値の位相変化を示している。高さによってピーク値の位相変化の傾向は違うので、 $Y/d=0.12$ 以上と以下に分けて示した。図-10 (a)は $Y/d=0.12$ 以下の二つの高さでのピーク値の位相変化を示しており、黒丸は $Y/d=0.05$ で、黒三角は $Y/d=0.1$ でのピーク値である。黒丸の方は位相の進みと共に値が小さくなっていることが分かる。黒三角の方は90度から130度の間で位相の進みと共に大きくなり、その後再び小さくなる。図-10 (b)は $Y/d=0.12$ 以上の二つの高さでのピーク値の位相変化を示しており、黒四角は $Y/d=0.2$ で、白三角は $Y/d=0.15$ でのピーク値である。両方とも位相の進みと共に大きくなっていることが分かる。

それぞれの高さでのパワースペクトルのピーク値の位相変化の違いは3・5節で説明する。

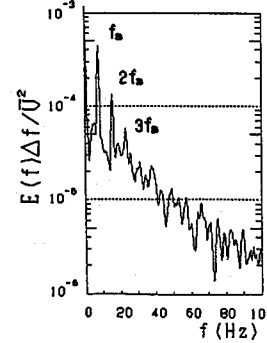
3・4 3次元構造に伴う速度変動の高周波成分の成長



(a) 位相90度-100度



(b) 位相120-130度



(c) 位相140度-150度

図-11 3次元構造に伴う速度変動の高周波成分の位相変化 ($Y/d=0.1$)

図-11 (a) - (c)は $Y/d=0.1$ でのそれぞれの位相で見つけた3次元構造に伴う速度変動のパワースペクトルを示しており、早い位相(図-11 (a))で見つけた3次元構造に伴う速度変動のパワースペクトルの高周波数成分は低いレベルに留まり、位相の進みと共に3次元構造に伴う速度変動の高周波数成分が

激しく成長すると共に、基礎周波数 $f_s = 7.8$ の所でのピーク値及びその2倍、3倍、4倍、5倍、6倍の周波数の所にスペクトルのピークがはっきり現れ、また、その値は増大している。これは単純な非線形干渉によるものではなく、位相の進みと共に、新たに増幅しよう乱が生まれてきたことを示している。その後、高周波数成分の成長はほとんど見られなくなり、図-11(b)に見られた低周波数のところでのピークもなくなり、パワースペクトルのレベルは全体的に低くなっていることが分かる。

3・5 高せん断層の位相変化と3次元構造の発生・発達・減衰との関係

3次元構造のこの一連の変化を説明する為に3次元構造に伴う速度分布のアンサンブル平均値を求め、更にこれらの値を用いて、せん断力のアンサンブル平均分布を計算した。図-12はそれらの分布を示している。特に注目すべきことは壁面近くの高せん断層の減小と壁面から少し離れた所の高せん断層の存在及び位相変化である。減速期の初期に壁面近くの高せん断力が大きく、位相の進みと共に減少していることが分かる。この減少は主に主流の変化によるもので、3次元構造に伴う速度変動の壁面近くの減衰の原因となっている。壁面から少し離れた所の高せん断層はほとんど3次元構造によるもので、この近傍の高さでの高周波数成分の成長はこの高せん断層の高周波の二次不安定性によるものと考えられる。また、壁面から10 mm以上を離れた所のせん断力はこの高せん断層の発達と共に増大していく。これは3次元構造自身の自己誘導によるものと解釈できる。

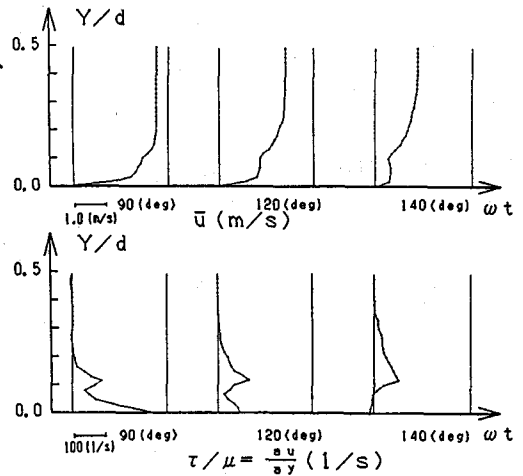


図-12 3次元構造に伴う速度 u のアンサンブル平均分布とせん断力 τ のアンサンブル平均分布の位相変化

4. おわりに

振動乱流中に存在する組織的乱流構造について、多数の熱線風速計と条件付抽出法を用いて定量的な計測を行い、3次元組織的構造に伴う速度変動のスペクトル特性を位相別に調べ、次のような結論が得られた。

- (1) 振動流の減速初期に発生した3次元構造の高さは最初低く、位相の進みと共に、徐々に高くなる。3次元構造に伴う速度変動の高さ方向の成長過程を明らかにした。
- (2) 減速期の初期に発生した3次元構造の強さは最初弱く、位相の進みと共に、徐々に強くなり、位相が更に進むと3次元構造はまた弱くなる。この3次元構造の位相変化はアンサンブル平均せん断力の位相変化と密接に関係しており、また、アンサンブル平均せん断力の位相変化によって説明できた。
- (3) 発生過程に見つけた3次元構造に伴う速度変動の高周波数成分のパワースペクトルは低いレベルに留まり、位相の進みと共に3次元構造に伴う速度変動の高周波数成分が激しく成長し、遅い位相になると、高周波数成分の成長はほとんど見られなくなる。こうした高周波数成分の位相変化は高せん断層の高周波の二次不安定性によるものと考えられる。

参考文献

- 1) 孟岩・日野幹雄・福西祐 : 第32回水理講演会論文集, pp. 601-605. (1988).
- 2) 孟岩・日野幹雄・福西祐 : 第33回水理講演会論文集, pp. 559-564. (1989).
- 3) Hino M., Fukunishi Y., Meng Y.: Experimental study of three dimensional large-scale structures in a reciprocating oscillatory flow. Fluid Dynamic Research. (1990) (printing)
- 4) 福西祐・孟岩・日野幹雄 : 交番振動乱流中の大規模乱流構造の熱線風速計多点同時測定による研究. 第21回乱流シンポジウム講演論文集, pp. 18-22. (1989).