

# マルチファン風洞によるアクティブ制御乱流生成法の研究

菊川裕規<sup>1</sup>, 黒田直孝<sup>2</sup>, 山神悠太<sup>2</sup>

<sup>1</sup>機械工学科, <sup>2</sup>機械工学科平成16年度卒業生

It is necessary to solve the characteristic of an atmospheric boundary layer or a strong wind in the case of construction of a large-sized structure. A wind tunnel experiment as the analysis for a natural wind is popular method. It is important to produce the flow which has the same turbulent characteristic as the natural wind in a tunnel. This research aims at reproducing the turbulent flow of the natural wind in a wind tunnel. As an active method, time changing the number of rotations of the fan in a wind tunnel equipment is carried out. Furthermore, the method of arranging a fan one by one to turn reverse rotation, which called Quasi-Grid method was used. As the current research, in addition to the conventional active control, the quasi-grid method was introduced. The result was obtained from the combination of quasi-grid method will be effective as a preset value at the time of reproducing arbitrary wind velocity in a wind tunnel. It turned out that the frequency region of the inertia sub range to be generated turbulent flow by spectral analysis.

*Key Words: Quasi grid, Active control, Multiple Fan Wind Tunnel*

## 1. はじめに

近年, 世界各地において大型建造物の建設が盛んに行われている。また, 塔, 煙突, アンテナ, クレーンなども大型化されてきている。これらの建造物は海上, 海岸, 平地, 都市部, 山間部などの様々な地形上に建設されており, 立地場所により異なる風の影響を受けることとなる。わが国は台風の常襲国でもあり, 大型建造物の建設の際には風の影響を無視することができない。そこで大気境界層や強風の特性の解明を行い, 高層ビルや巨大吊橋などの巨大建造物の耐風設計などを行つために, 自然風, 特にその乱流特性が必要となる。乱流特性の解析方法として有力な手段として風洞実験がある。その際, 風洞内に自然風と同じ乱流特性を持つ気流を再現する必要がある。風洞内に乱流を発生させる方法としては, 障害物から発生する後流を利用するパッシブな方法と, 本研究のように駆動機により流れにエネルギーを与えるアクティブな方法に大きく分けられる。

本研究は上記で述べたような大気境界層内における自然風の乱流特性の再現を目標とする。アクティブな方法として, 風洞装置の送風機の回転数を周波数や電圧値により時間変化させ, それにより発生した風の乱流特性を詳しく調べる。昨年度までの研究では全送風機を正転させ同一制御信号により気流を生成していたが, 本年度は送風機を正転, 逆転の交互に配列し擬似的な格子により気流を生成する方法を用いた。送風機制御により時系列的に変動する波形を作り出すとともに, 擬似的な格子状態により後流の渦を作り出す狙いがある。アクティブ制御にこのパッシブな要素を用い乱流の生成を行う方法を擬似格子法と名づけ, この擬似格子法の基礎的な性能評価を行うことを本研究の目的とした。

## 2. 実験装置

### 2.1 風洞装置概要

本風洞は送風機部に小型送風機を縦5列, 横3列, の計15個備え, 送風機部で発生した風が縮流部を通過して観測部に入る吹出し型風洞である。観測部は長さ3600m, 高さ, 幅ともに540mの風路断面を持つ。この風洞装置の概要を図1に示す。この図において流下方向にX軸を取り, 縮流部出口を原点とする。また風路断面における幅方向をY軸とし送風機側から見て左風路壁面を原点, 高さ方向をZ軸とし風路底面を原点とする。

### 2.2 測定装置

気流の測定にはX型の熱線風速計を使用している。熱線風速計は直径5 $\mu$ mの白金線を熱し, 気流により放熱されるとき電気抵抗の変化を風速値に換算する仕組みで, 応答性がよく, 気流の乱れの測定に適している。図2に測定装置を示す。

熱線風速計の原理は, 直径5 $\mu$ mの白金線を熱したプローブを気流の中に投入することで, 熱が奪われ

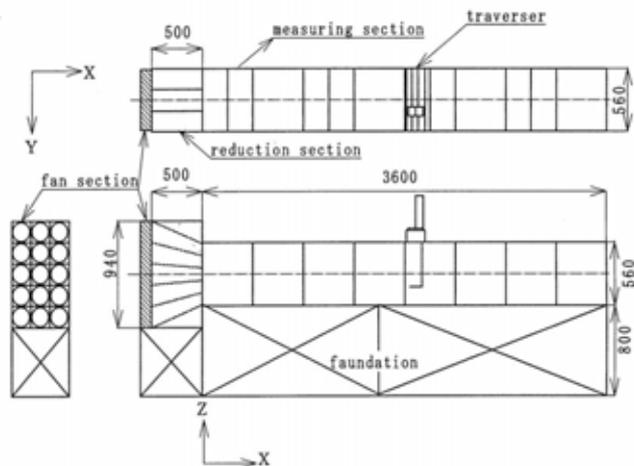


図1 風洞装置概要



図 2 測定装置

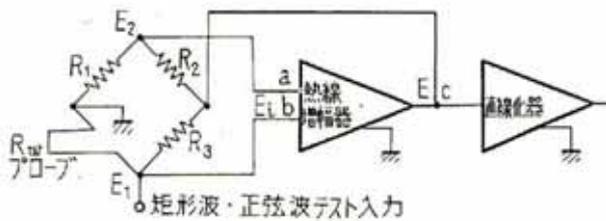


図 3 熱線風速計のブロック線図

る．プローブの白金線はホイートストンブリッジの一边として構成されているため，熱が奪われて電気抵抗値が変化することでブリッジの電氣的なバランスが崩れる．このときのバランスを元に戻そうとする動き，起電力が生じる．起電力は風速に応じて変化するため，これを風速値へ変化するという仕組みである．プローブと CTA アネモマスターユニットの関係を表したブロック線図を図 3 に示す．

### 2.3 制御装置

風洞に風が生成されるまでの一連の流れを図 4 に示す．まずはパソコンにより制御信号を与える．パソコンから与えられた信号は D/A コンバーターによりデジタル信号からアナログ信号に変換される電圧値としてインバーターに送られる．インバーターにより電圧信号を周波数変換し送風機の制御することで気流が生成される．

風速値がパソコンに保存されるまでの流れを図 5 に示す．風は熱線プローブにより感知され CTA アネモマスターユニットにより増幅される．その後リニアライザーユニットにより一次式に変換され A/D コンバーターでアナログ信号からデジタル信号に変換される．計測はパソコンの測定プログラムにより制御する．

## 3. 実験方法

### 3.1 擬似格子法

本風洞が持つ送風機列の回転方向の組合せにより，擬似的に格子乱流状態を作り出す．本実験では，吹出し回転(正転)と吸込み回転(逆転)を交互に配列する．正転，逆転の切り替えはインバーターによって行う．この擬似格子法はアクティブ制御ではあるが，擬似

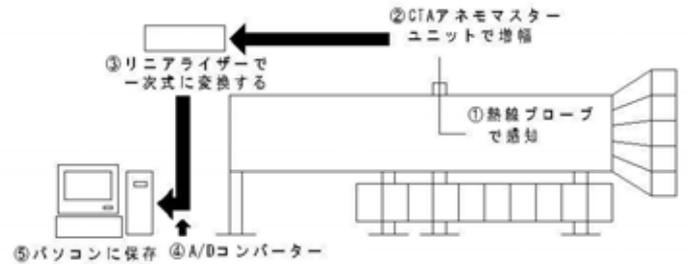


図 4 送風機作動までの流れ

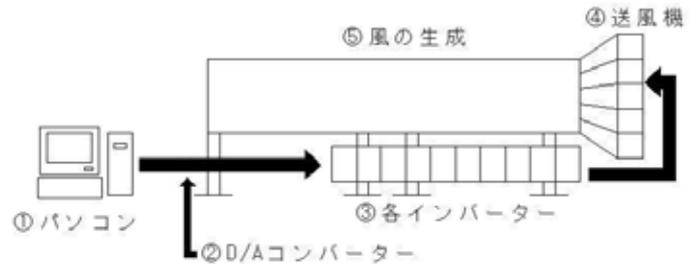


図 5 風速測定の流れ

的に格子を作り出しているのでパッシブな要素も含んでいる．この擬似格子パターンを図 6 に示し，以下に擬似格子法の評価としての実験方法を示す．

### 3.2 風路断面分布の測定

風路断面についての風速と乱れ強度についての分布状態を測定する．入力電圧を断面について高さ方向に 9 点，幅方向に 5 点，の 45 点を計測した．また，測定点を流下方向にずらして 2 つの断面，入り口付近 ( $x=500\text{mm}$ ) と出口付近 ( $x=3000\text{mm}$ ) について測定した．

断面の測定点へは，トラバースを用いてプローブの位置を移動させる．風路長方向は，トラバースごと移動させる．また測定条件としては各送風機の入力電圧 5V，計測周期 500  $\mu\text{sec}$ ，計測点数 32768 点として行った．

### 3.3 流下方向分布の測定

風洞の流下方向(風路長方向)に対しての風速，乱れ強度分布を測定する．測定点は風路断面の中心部とする．流下方向に対し  $x=500\text{mm}$  の地点から  $x=3000\text{mm}$  までの地点に向かって 500mm 間隔で計 7 点測定した．

また測定条件としては各送風機の入力電圧 5V，計測周期 500  $\mu\text{sec}$ ，計測点数 32768 点として行った．

### 3.4 正逆転制御電圧値のパターン変化

3.3, 3.4 の方法では正逆転の送風機の制御電圧値を同一とした．すなわち，送風機の正転方向と逆転方向の回転数は一致していた．そこで，制御電圧の組合せを変化させたときの平均風速の変化を測定する．測定点は風路出口付近 ( $x=3000\text{mm}$ ) における風路断面の中心とする．

制御条件は逆転を基準とした時の正転 1 倍，2 倍，3 倍，5 倍，10 倍の比と逆転を 0 とした場合について．また計測周期 500  $\mu\text{sec}$ ，計測点数 32768 点として行った．

### 3.5 周波数応答特性の測定

送風機の入力電圧を正弦波形で与える。その時の入力電圧 (Input) と出力電圧 (Output) の電圧値の波形から追従性を測定する。測定点は風路出口付近 (x=3000mm) における風路断面の中心とする。

測定条件としては送風機の周波数を 0.1~3Hz 範囲で振幅を 2V として測定した。また入力電圧 5V, 計測周期 500 μ sec, 計測点数 30000 点として行った。

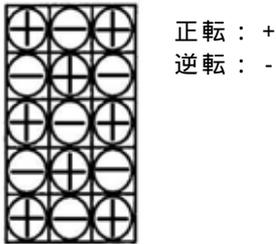


図 6 擬似格子配列

## 4. 実験結果

### 4.1 風路断面分布の結果

入り口付近と出口付近の風速分布を図 7 と図 8 に示す。このグラフより風速は入り口付近 (x=500mm) で全体的なばらつきが大きく、出口付近 (x=3000mm) ではばらつきもそれほどなく一様化が進んでいるということが分かる。入り口付近の傾向として中心部は低い値となり、右上と左下に風速の高い地点ができています。また、出口付近でも風路壁付近の方がより高い風速値となっている。

この結果は送風機の回転状態による影響を受けていることが考えられる。送風機により発生した風が縮流部出口で外側に広がるような渦状流れとなっているためである。

入り口付近と出口付近の乱れ強度を図 9 と図 10 に示す。このグラフより乱れ強度は、入り口付近 (x=500mm) では 0.3~0.45 くらいの高い値を、出口付近 (x=3000mm) では 0.1~0.16 くらいの低い値を

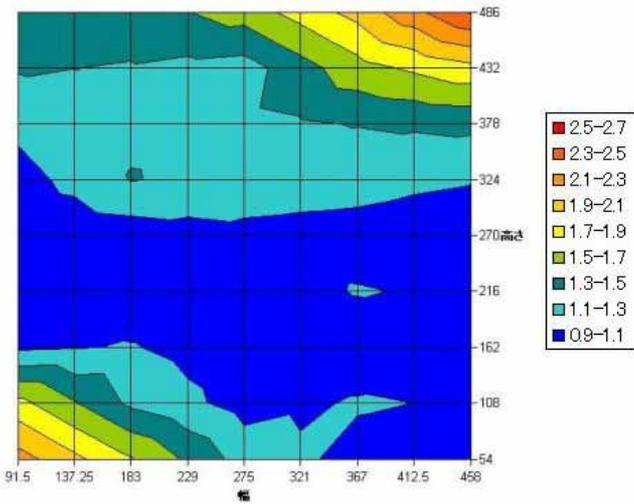


図 7 風速分布 (x=500mm)

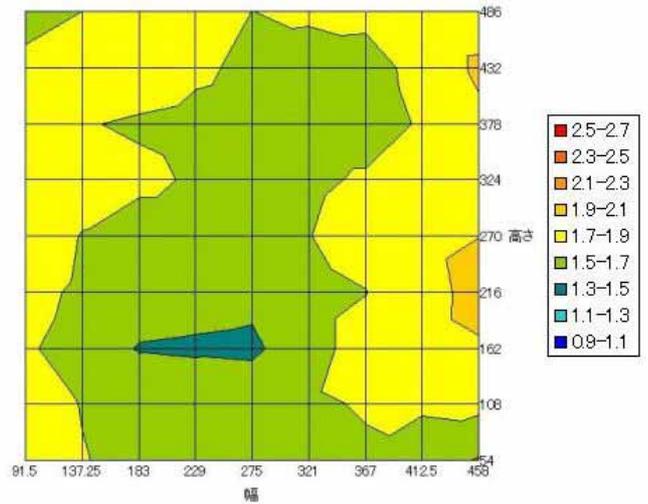


図 8 風速分布 (x=3000mm)

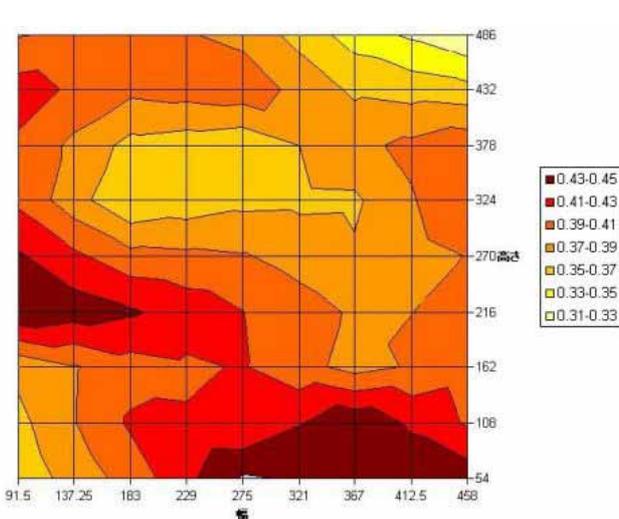


図 9 乱れ強度分布 (x=500mm)

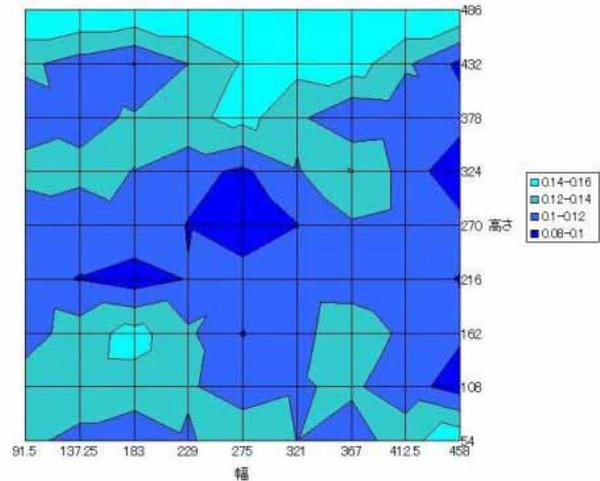


図 10 乱れ強度分布 (x=3000mm)

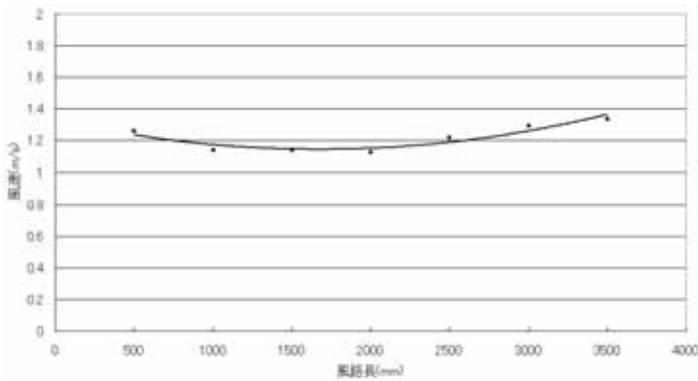


図 11 流下方向における風速変化

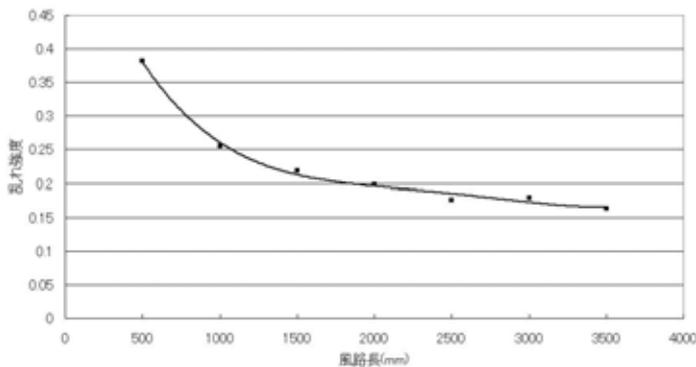


図 12 流下方向における乱れ強度変化

とっているということが分かる。乱れ強度は風速データの時系列に対する標準偏差(ばらつき)の度合いとの度合いといえるので平均風速で除すことで無次元数となっており、各点で比較できる。出口付近では入口付近に比べ値が低くなっており、気流の状態としては時間変動の一様化が進んでいると言える。

#### 4.2 流下方向分布

流下方向における風速変化を図 11 に示す。このグラフより風速は流下方向に対し一度下がって上昇するという曲線を描いているということが分かる。このことから入り口付近では気流の混合過程で風速値減少の傾向を見せ、出口付近に近づくにつれ境界層(壁面)の発達に伴い連続の式の効果で風速値がやや上昇するということが考えられる。すなわち、境界層により風路断面中心部付近の断面積が狭まる。

流下方向における乱れ強度変化を図 12 に示す。このグラフより乱れ強度は流下方向に対し減少していく曲線を描いているということが分かる。500mm ~ 1500mm への移行過程で特に大きく減少しており、気流の混合、一様化が急速に進んでいると言える。

#### 4.3 正逆転制御電圧値の組合せ

正転送風機と逆転送風機を制御する電圧値を変えたときの組合せによる風速値の分布状態を図 13 に示す。この図の意義は正逆転電圧の組合せに対する風速値が割り出せることである。例として、3m/s の風速値が得られる近似直線を求めるとその近似式は

$$y = 1.82x - 8.48$$

y: 正転送風機電圧[V]  
x: 逆転送風機電圧[V]

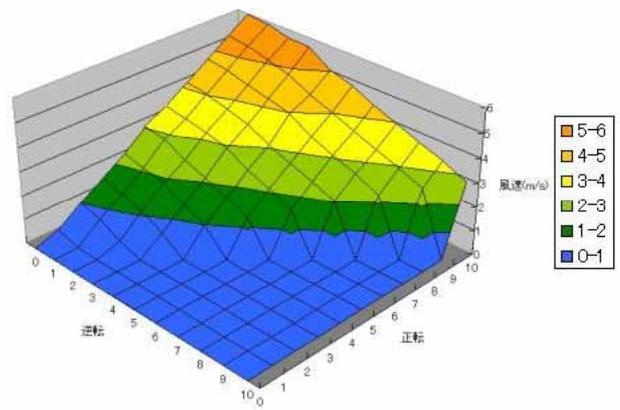


図 13 正逆転電圧値の組合せによる風速値分布

となった。

#### 4.4 スペクトル解析

時系列の変動波形である測定データを、FFT 変換によってスペクトル解析を行う。FFT 変換により得られたパワースペクトルの波形から、Kolmogorov の局所等方性理論により慣性小領域と呼ばれる周波数域を割り出す。慣性小領域、すなわち周波数の $-5/3$ 乗の傾きに沿う周波数域である。

図 14 にスペクトル解析後の波形を示す。図中の赤い直線が周波数の $-5/3$ 乗の傾きである。送風機の回転数が低速の場合に比べて高速の場合のほうが慣性小領域が広がっていることがわかる。慣性小領域の割り出しを最小自乗法によって行った。高周波数側の値を削って近似式を割り出し、式の指数値が $-5/3 \pm 0.5\% = 1.66 \pm 0.5\%$ となる範囲を採用した。図 17 に示す組合せの慣性小領域は次のようになる。

正転：逆転の組合せとして、  
 1V：1V...確認できず      2V：2V... ~ 54Hz  
 5V：5V... ~ 400Hz      8V：8V... ~ 460Hz  
 10V：10V... ~ 540Hz

送風機の回転数が低くなる制御電圧値の組合せでは気流変動に与えるエネルギーが小さいため、慣性小領域が現れないと考えられる。送風機の回転が気流に与えるエネルギーが十分に大きい場合には、慣性小領域が現れている。

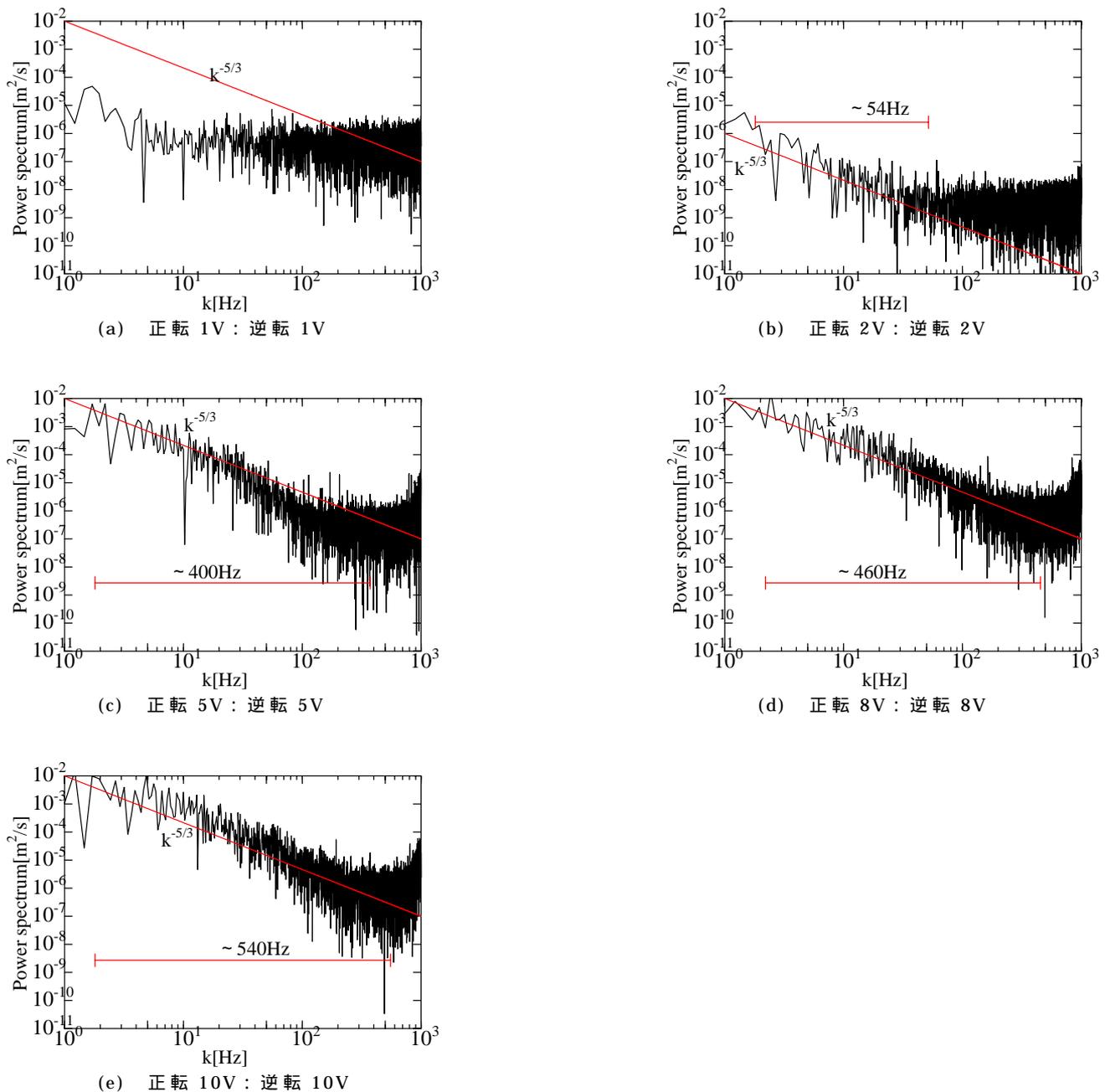


図 14 スペクトル解析結果

#### 4.5 周波数応答

周波数応答特性の評価として、制御電圧を正弦波波形として与え測定風速値の波形と比較した 図 15 に各周波数における制御電圧の波形及び測定風速値の波形を示す。

周波数 0.1Hz では制御電圧の波形の周期と出力波形の周期が良く一致していることが確認できる。それ以降、周波数が高くなるにつれて振幅が小さくなり、正弦波波形が次第に崩れていくことがわかる。周波数 1.0Hz においては測定風速値の波形はランダムな変動を起こしている。高周波側では制御

電圧に対して気流変動の追従性が悪くなったと言える。周波数応答性について、各周波数における測定データの波形からスペクトル解析によりピークスペクトルを求め、ゲイン曲線を作成した。得られたゲイン曲線を図 16 に示す。図 19 は最も高い追従性を示した 0.1Hz 時のピークスペクトルを 1 とした比で表した 図 4.11 より折点周波数は約 0.4Hz となり、0.4Hz の周波数までは制御波形に従う測定風速値の波形を得ることが期待できる。

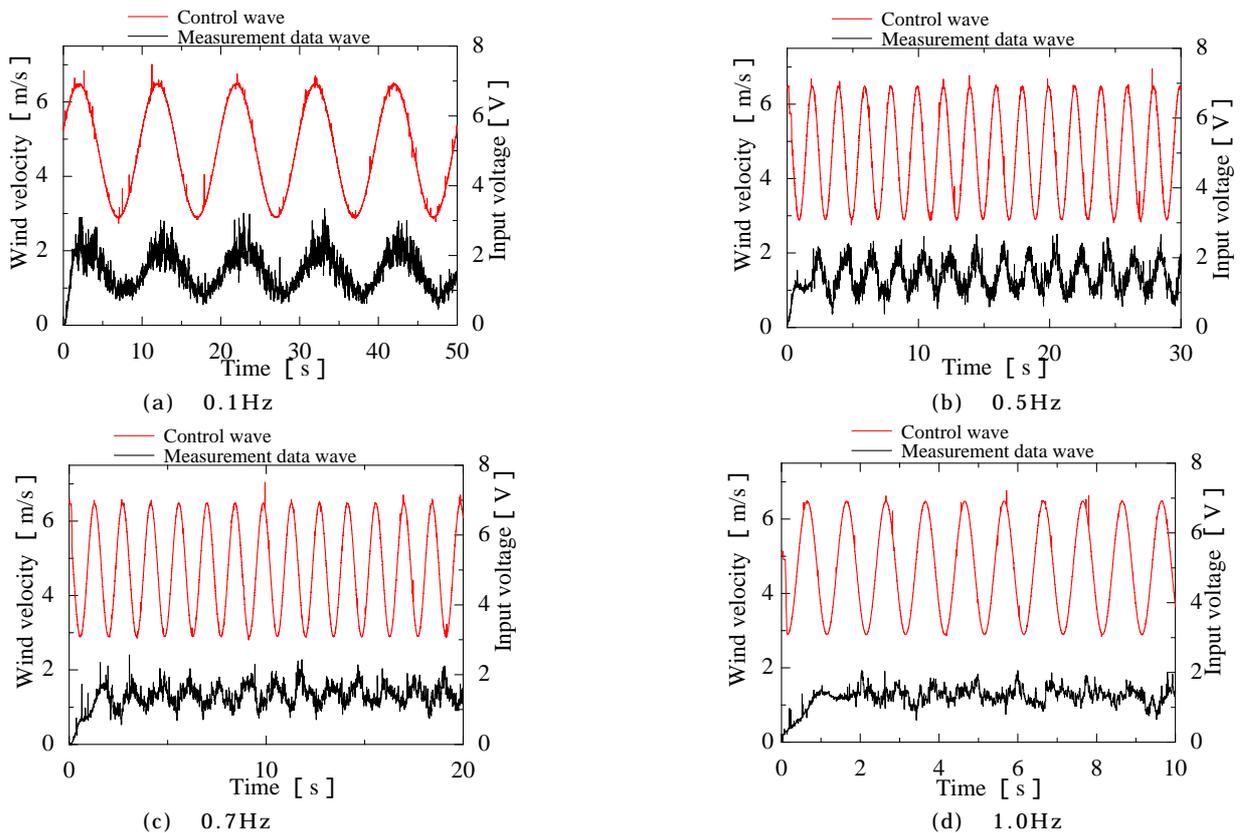


図 15 周波数応答波形

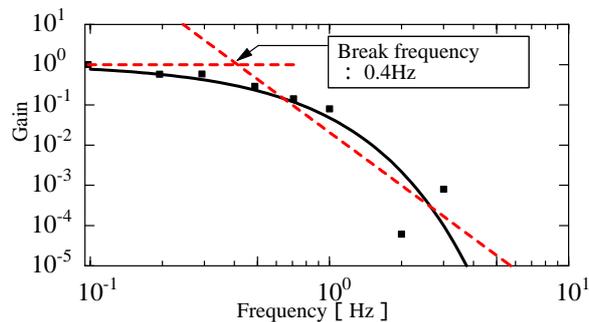


図 16 ゲイン曲線

## 5. おわりに

本年度の研究では、従来のアクティブ制御に加えて擬似格子法を新しく導入し、性能評価実験を行った。

正逆転制御電圧値の組合せより得られた結果は、今後風洞内に任意の風速を再現する際の設定値として有効である。

スペクトル解析は、風洞内における気流の乱流状態を知る目的で行った。送風機の回転により気流に十分なエネルギーを与えた場合においては、乱流の生成過程と言える慣性小領域の波数域が存在していることがわかった。

周波数応答性の評価により、本擬似格子パターンにおいても低周波数領域では風洞内の気流変動が制御電圧に対して追従することが確認された。しかし、

0.4Hz より高い周波数領域では、気流変動の制御は困難であることが明らかとなった。

今回、擬似格子法により一様な風速分布の乱流特性が得られたが、今後、大気境界層分布を擬似格子法により再現することを課題とする。

## 参考文献

- (1) 菊川裕規：乱流風洞の基礎的研究(1999)。
- (2) 日野幹雄：スペクトル解析,朝倉書店(1977)。
- (3) 塩谷正雄：強風の性質,開発社(1979)。
- (4) 木田重雄,柳瀬眞一郎：乱流力学,朝倉書店(1999)。  
(2005.9.30 受付)