

# アクティブフィンを用いた建造物の風振動制振に関する実験的研究

清水 欽也 齋藤 勉  
古川 忠稔 田村 保  
池田 省三 佐野 泰三

## 要 旨

本報では、建造物の風による振動を制御するために風による抵抗力を利用するアクティブフィンシステムについて報告する。模型を用いた風洞実験により制振効果を検証後、実大レベルのアクティブフィン制振装置を製作した。その装置を技術研究所内の制振実験棟に搭載し、強風時に効果検証実験を行った。その結果、応答速度のRMS値で振幅の低減効果が確認できた。また、建造物の振動の状態に対応するフィンのあるべき状態（向き）を逆にした逆制振を行うと応答速度の振幅が増幅され、アクティブフィンによる影響が確認できた。

## 1. まえがき

従来、風に対する制振構法の代表的なものにはTMD（チューンドマスダンパー）、AMD（アクティブマスダンパー）、HMD（ハイブリッドマスダンパー）などがあるが、いずれの手法も建築物総重量の約1%程度を上限とする制振体マスをパッシブ/アクティブに駆動させることにより、建築物に発生する水平振動を低減させる機構となっている。しかしながら、これらの制振構法ではいずれも建築物総重量の約1%程度ものマスを屋上階などに設置するために広いスペースと、そのマスを支えるための堅牢な基礎構造を必要とする。また、HMDやAMDによる制振構法の場合には、外乱に対する建築構造物の応答の大きさによっては大きな制御力を必要とするため、外部からの多大なエネルギー供給が必要となる。

そこで、建築物への制振構法の適用上からは、比較的小スペース・省エネルギーで高い制振効果が得られる制振構法が望まれている。これらを解決する手段のひとつとしてアクティブフィン制振構法が提案<sup>1) 2)</sup>されており、風洞による模型実験および数値シミュレーションによる制振効果の確認<sup>3) 4)</sup>がなされている。同構法では、振動制御力として建築構造物の振動外乱である風を利用するものであり、AMDなどと比べて省エネルギーを実現した制振構法である。また、その設置場所として屋上を利用することが可能であり、装置そのものもAMDに比べて小さく、省スペースが可能な制振構法である。

このようなアクティブフィン構法の適用性の検討は風洞実験レベルで実施済みであるが、実建築物に適用する

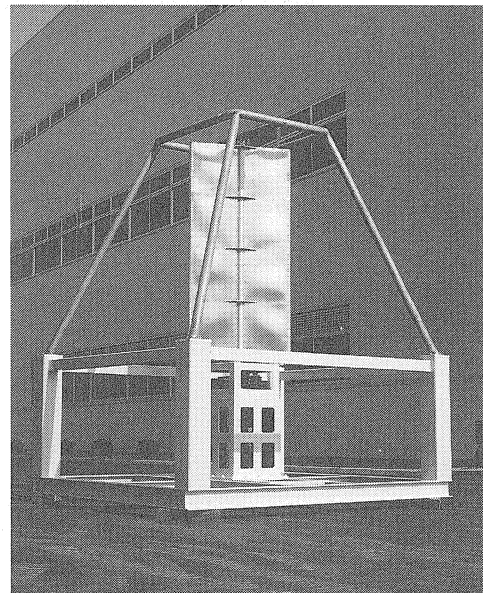


Photo.1 View of the active fin.

Table.1 Explanations of active fin.

Projected Area	0.2m <sup>2</sup> ~ 2.0m <sup>2</sup>
Weight	1.5t
Motor Power Output	3.7kW
Max Revolution Speed	150rpm

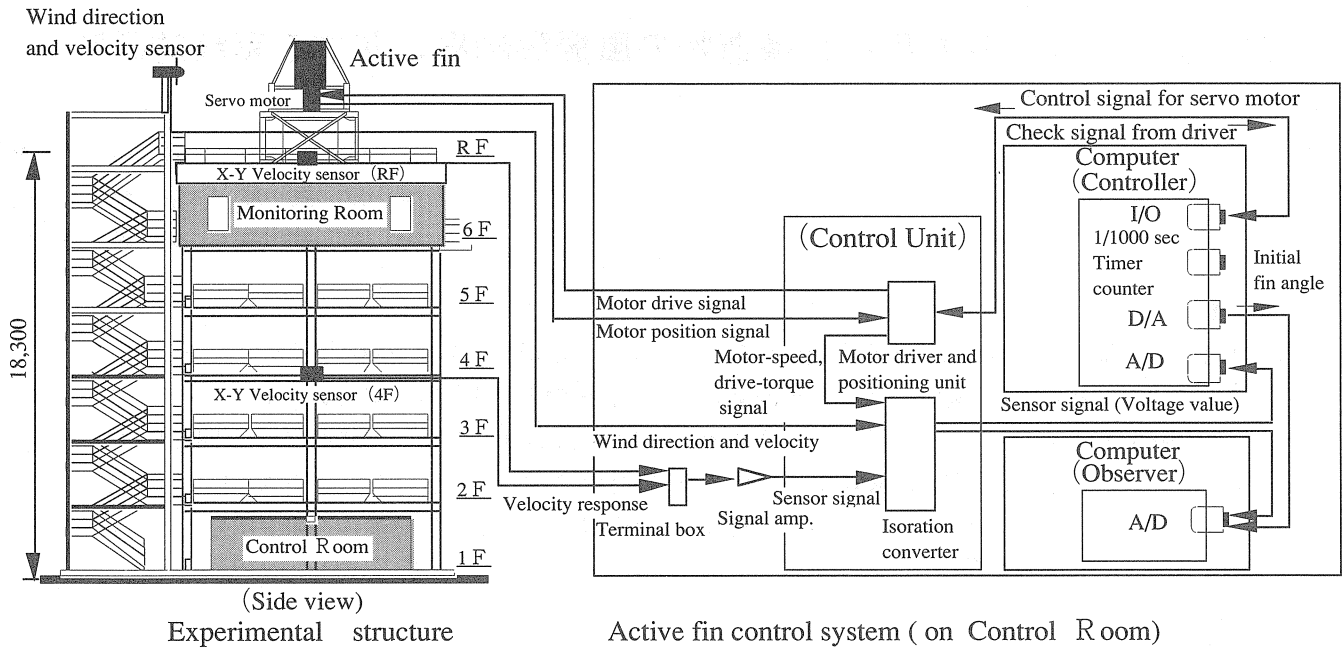


Fig.1 Configuration and flow diagram of the active fin control system.

ためにはアクティブフィンの形状、およびその駆動方法など解決すべき問題点が残されている。そこで、今回アクティブフィンの発案者である大阪大学建築学教室井上研究室と共同で、模型実験で効果検証済みのアクティブフィンを実大レベルで製作し、那須技術研究所内の制振実験棟<sup>5)</sup>に搭載し、強風時の制振効果を確認するとともに、実用化のための適応性を検討した。

## 2. アクティブフィン制振装置

### 2.1 概要

Photo.1にアクティブフィンの外観を示す。アクティブフィンシステムは、構造物に可動翼（アクティブフィン）を設置し、風方向に対する見付面積を変化させることにより、フィンに作用する風抵抗力を有効な制御力として利用し、風振動している構造物を制振させるシステムである。今回製作したアクティブフィンは、構造物のいずれの方向に対しても対応可能なように鉛直軸を中心に回転可能な機構としている。フィンの受風面の大きさは縦2m横1mで、制振実験棟の6階体験ルームの受風面積に対する面積比は、X方向では約7%、Y方向で約13%となっている。本装置では、フィン本体の材質にアルミニウムを使用し、フィンの高速回転・停止が可能なよう軽量化を図っている。フィンは上下2箇所ではベアリングによりステイに支持されており、減速機（Gr=1/11）を介してACサーボモータにより駆動される。フィンは

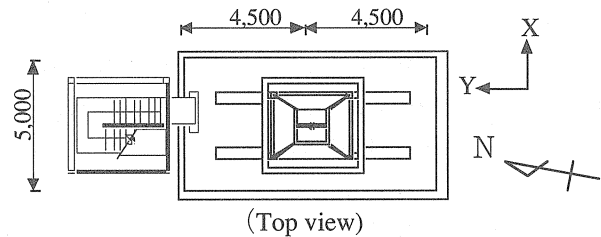


Fig.2 Arrangement of the active fin.

水平面内全方位に対する回転位置決め制御が可能であり、任意位置での停止状態から90度回転し、停止するまでの実際の所要時間は、約0.23秒となっている。Table.1にアクティブフィン制振装置の諸元を、Fig.2にR階でのアクティブフィン制振装置の配置を示す。

### 2.2 制御システム

Fig.1にシステムの概要を示す。制御システムは、実験棟R階中央に設置したアクティブフィン装置、実験棟1階の観測ハウス内にある駆動制御・観測部、およびR階と4階に設置されたセンサ（速度型地震計）より構成される。フィンの回転駆動制御は以下の順序で行う。制御部で扱う状態量として、風向・風速計、R階と4階に設置した速度計からの入力を用いる。これらの状態量を

もとに、駆動制御部で風向きに対してフィンが適正な見付面積になるように、フィンの回転方向に対する回転角度量（インクリメント）を算出する。この制御量は、モータドライバを介してフィン駆動部に出力され、アクティブフィンの制振動作が行われる。また、観測部では、これら状態量と、モータ回転速度および駆動トルクを観測し、フィンの駆動状態を監視している。

### 2.3 制御アルゴリズム

アクティブフィンによる制振の基本的な発想は、構造物の振動の向き（速度の向き）が風上向きとなるときにはフィンの状態をOpen ModeからClosed Modeへと変化させ、逆に、風下向きとなるときにはClosed ModeからOpen Modeへ変化させることで、これら状態変化にともなうフィンの受ける風抵抗力の増減分を制御力として構造物に作用させるというものである。

制御アルゴリズム説明のため、Fig.3に実験棟のX、Y軸とフィンの角度および風向との関係を示す。図はフィンを真上から見たものであり、フィンの水平断面の長辺を通る軸を「フィンの主軸」とする。図中、 $\theta_f$ はフィンの主軸とX軸とのなす角度を表し「フィンの設定角度」とする。また、 $\theta_w$ は風向とX軸とのなす角度を表し「風向の角度」とする。これらの量は、いずれも反時計回りを正符号とする。 $V_x$ および $V_y$ は、それぞれX、Y軸方向の実験棟RFの絶対速度を表す。

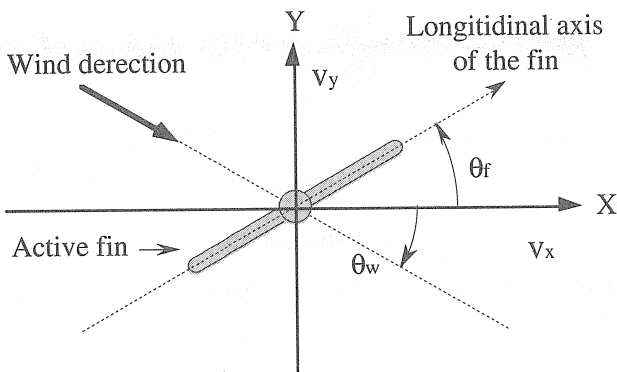


Fig.3 Coordinate of the active fin and the wind.

また、Fig.4にアクティブフィンの制御に用いるフィンの2つの状態を示す。まず、フィンの状態を表現するために回転方向の軸として「フィンの基準軸」なるものを定める。図中、 $\theta_r$ はフィンの基準軸とX軸とのなす角度を表し「フィンの軸角度」とする。図に示すように、

フィンの基準軸とフィンの主軸が一致する状態をOpen Mode、フィンの基準軸とフィンの主軸が $90^\circ$ の角度をなす状態をClosed Modeとする。

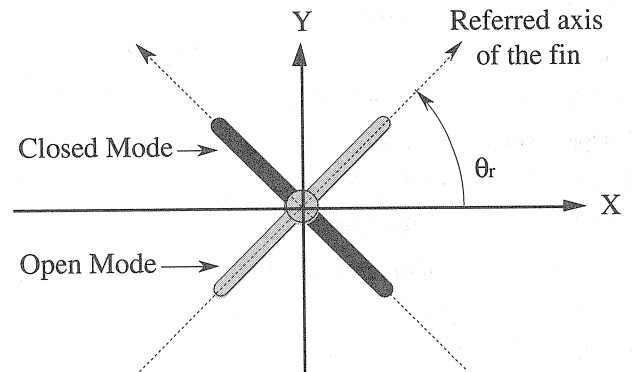


Fig.4 Configuration of the active fin.

アクティブフィンの制御は、各制御ステップごとに、状態量として、外乱に関する情報（風向および風速）と、応答に関する情報（実験棟最上階のX、Y方向の速度）を用い、フィンの回転角度量  $\Delta \theta_f$  を制御量として算定するものである。制御アルゴリズムは、以下に説明するような手順である。

1) 風方向風速  $W$  の値を評価し、その大きさが風速の域値の  $\delta w$  を超えない時には、フィンの状態を前制御ステップの状態で保持するものとする。

2) 構造物の振動方向を、最上階のX、Y方向の速度  $V_x$ 、 $V_y$  から求め、その制御ステップにおけるフィンの基準軸を決定する。この手順は、まず、 $V_x$ 、 $V_y$  のそれぞれの大きさと速度の域値  $\delta v$  との大小比較をし、フィンの軸角度  $\theta_r$  を次のように定める。

$|V_x| < \delta v$ 、かつ、 $|V_y| < \delta v$  の時には、フィンの状態を前制御ステップの状態で保持するものとする。

$|V_x| < \delta v$ 、かつ、 $|V_y| \geq \delta v$  の時で、

$V_y \geq \delta v$  の時には、 $\theta_r = 90^\circ$ 、

$V_y \leq -\delta v$  の時には、 $\theta_r = -90^\circ$  とする。

$|V_x| \geq \delta v$ 、かつ、 $|V_y| < \delta v$  の時で、

$V_x \geq \delta v$  の時には、 $\theta_r = 0^\circ$ 、

$V_x \leq -\delta v$  の時には、 $\theta_r = -180^\circ$  とする。

$|V_x| \geq \delta v$ 、かつ、 $|V_y| \geq \delta v$  の時で、 $V_x$ 、 $V_y$  を合成した速度ベクトル  $V$  が、

第1象限上にある時には、 $\theta_r = 45^\circ$ 、

第2象限上にある時には、 $\theta_r = 135^\circ$ 、

第3象限上にある時には、 $\theta_r = -135^\circ$ 、

第4象限上にある時には、 $\theta_r = -45^\circ$  とする。

3) このようにして、定めたフィンの基準軸と風向とのなす角度  $\Delta\theta_w$  が、 $\theta_r - 90^\circ < \Delta\theta_w < \theta_r + 90^\circ$  の時には、フィンを Open Mode とし、それ以外のときには、フィンを Closed Mode とする。

4) 以上の評価から、[1] フィンの状態を保持する場合には、フィンの回転角度量  $\Delta\theta_f = 0$  とし、[2] フィンを Open Mode とする場合には、現在のフィンの設定角度  $\theta_f$  とフィンの軸角度  $\theta_r$  との差  $\Delta\theta_r (= \theta_r - \theta_f)$  を用いて、フィンの回転角度量  $\Delta\theta_f = \Delta\theta_r$  とし、[3] フィンを Closed Mode とする場合には、フィンの回転角度量  $\Delta\theta_f = \Delta\theta_r + 90^\circ$  とする。ここで、用いてきた X 軸を基準とする絶対角度に関する記号 ( $\theta$ )、および相対的な角度に関する記号 ( $\Delta\theta$ ) は、ともに全て  $-180^\circ \leq (\theta) < 180^\circ$ 、 $-180^\circ \leq (\Delta\theta) < 180^\circ$  の範囲で定義された量であり、計算上、この範囲を超える値を扱う場合には、この範囲の同位相の値で置き換えたものを用いる。Fig.5 に制御アルゴリズムをフローで示す。

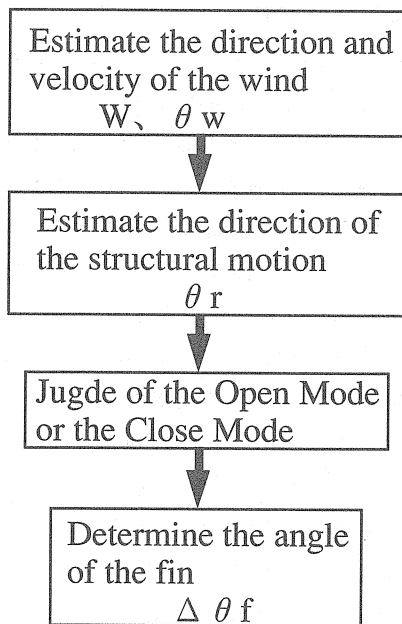


Fig.5 Flow of the control algorithm.

### 3. 強風時の実験結果

#### 3.1 実験条件

実験棟 R 階に設置した風向・風速計で計測された実験時の風向は、ほぼ実験棟の Y 軸方向と同じ方向の北西の風 (約  $\pm 45^\circ$ ) であり、また、平均風速は約 15 m/sec (約  $\pm 10$  m/sec) であった。アクティブフィンのトリガとなる風速および実験棟 R 階の速度の域値は、それぞれ 1.0 m/sec、0.05 cm/sec と設定した。この制振制御アルゴリズムによる「制振」実験の他に、さらにアクティブフィンの潜在的な能力を検証するための一つの手段として、建物の応答を励起させる制御アルゴリズムを用いた「逆制振」実験も行った。この逆制振のアルゴリズムは、制振制御アルゴリズムによって決定されるフィンのあるべき状態 (Open Mode あるいは Closed Mode) を逆にしただけのものである。

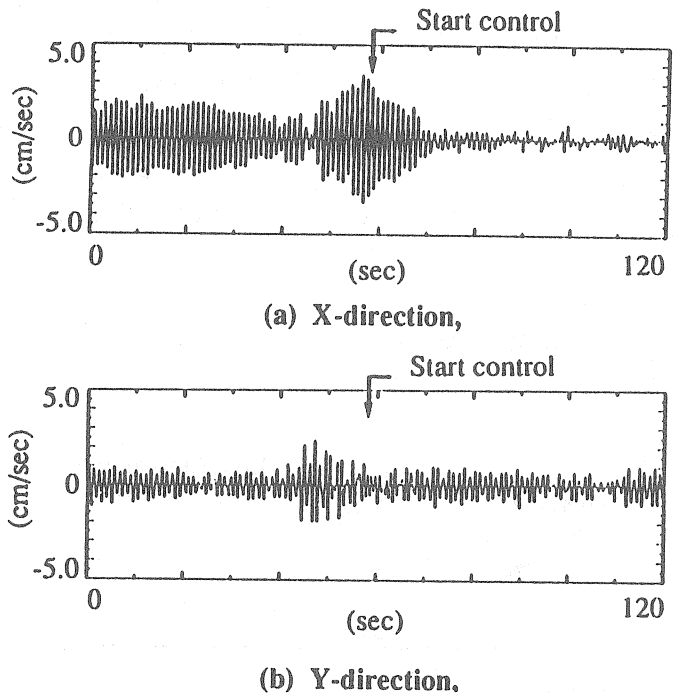


Fig.6 Velocity of the top floor (Reducing Control).

Table.2 RMS values of velocity of the top floor.

RMS (cm/sec)	X-direction		Y-direction	
	0 - 40 sec (Non-control)	80 - 120 sec (Control)	0 - 40 sec (Non-control)	80 - 120 sec (Control)
Reducing control	1.12	0.19 (17%)	0.44	0.43 (98%)
Amplifying control	0.74	2.20 (297%)	0.41	0.23 (55%)

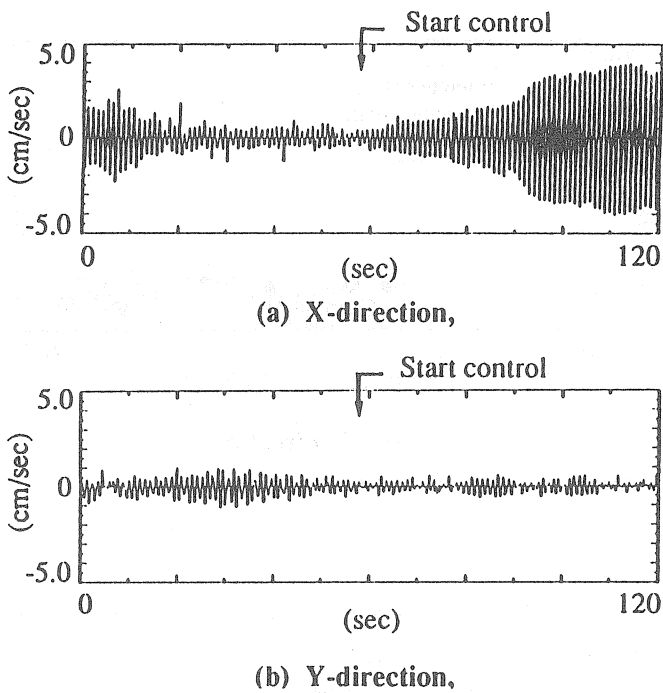


Fig.7 Velocity of the top floor (Amplifying Control).

3.2 結果と考察

Fig.6に、制振制御時の実験棟 R 階の X 方向、Y 方向の速度応答をそれぞれ示す。図は、前半約 60 秒間が非制御で、後半約 60 秒間に制振制御を行ったものである。X 方向に関しては、有効な応答の低減効果が見られるが、Y 方向に関しては、非制御の場合と比較してほとんど差異が見られない。また、Fig.7 には逆制振制御時の実験棟 R 階の X 方向、Y 方向の速度応答をそれぞれ示す。図は、前半約 60 秒間が非制御で、後半約 60 秒間に逆制振制御を行ったものである。X 方向に関しては、

速度振幅が大きく増幅されていることがわかる。しかしながら、Y 方向に関しては、制振制御時と同様に、非制御の場合と比較してほとんど差異が見られない。

Table.2に、これらの図に対応した制御前後における実験棟 R 階の X 方向、Y 方向の速度応答の RMS 値を示す。表中の括弧内の数字は非制御時に対する制御時の RMS 値(%)であり、制御効果は、X 軸方向についてのみ現われている。Fig.8 に、非制御時、制振制御時、逆制振制御時の実験棟 R 階の速度軌跡をそれぞれ示す。

Fig.8 (a) と Fig.8 (b) を比較すると、制振制御により、速度の軌跡が非制御時よりかなり縮小されており、有効な制御効果が確認される。Fig.8 (a) と Fig.8 (c) を比較すると、逆制振制御時の場合は、構造物が励振されていることがわかる。いずれの制御を行った場合においても X 方向に対する制御効果は見られるが、Y 方向に関しては、ほとんど非制御時と変わらない。Fig.9 に、非制御、制振制御、逆制振制御時における風速の RMS 値と、実験棟 R 階の速度応答の RMS 値との関係を X 方向、Y 方向に関してそれぞれ示す。Fig.9 (a) の X 方向の速度応答の RMS 値については非制御時、制振制御時、逆制振制御時の間に明確な違いを見ることができる。すなわち、非制御時に対して、制振制御時には、風速の違いによらず、ほぼ一様な応答の低減効果が見られ、また逆制振制御時には、かなりシャープな立ち上がりで、応答が増幅されることがわかる。しかしながら、Fig.9 (b) の Y 方向の速度応答の RMS 値については非制御時、制振制御時、逆制振制御時の間には、ほとんど差異は見られない。すなわち、この方向に対しては、制御による影響が極めて小さいものであると考えられる。

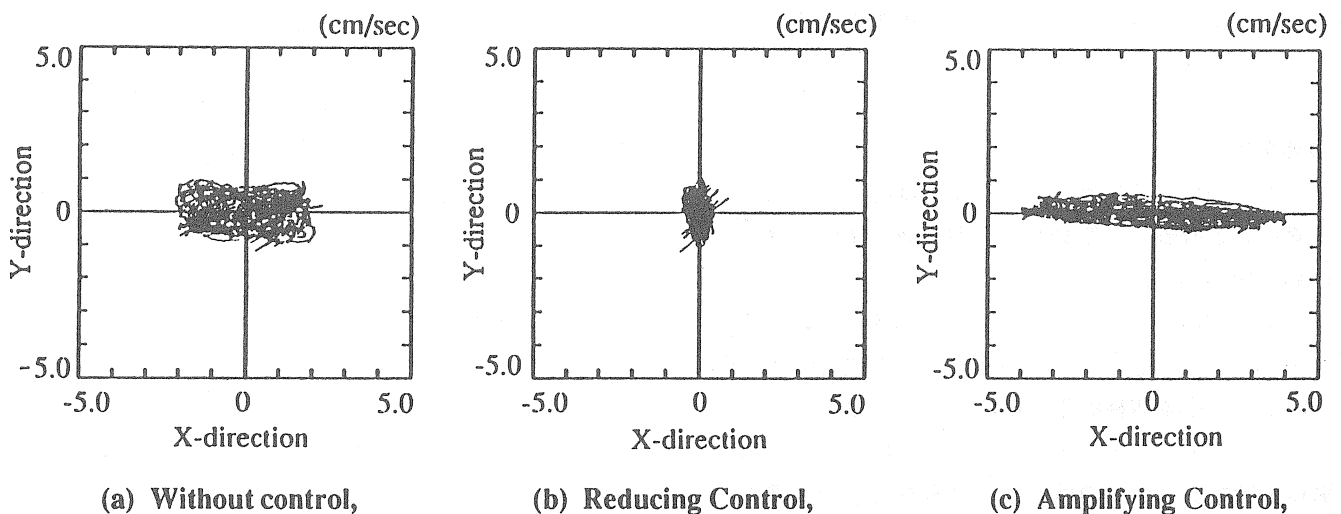
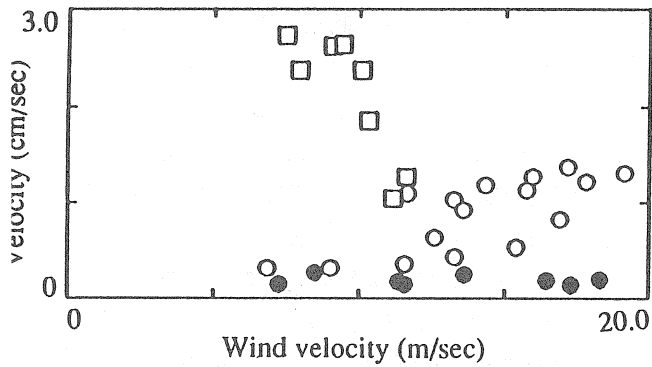
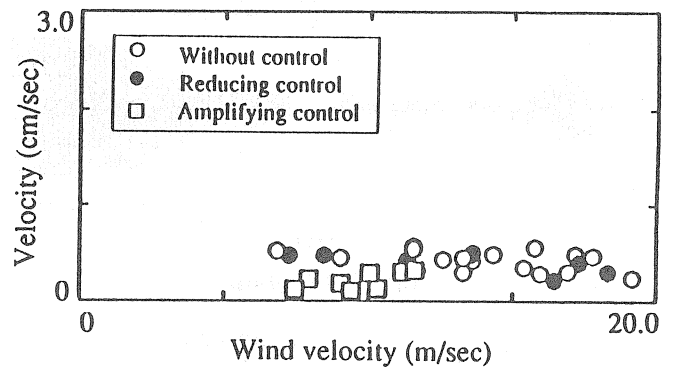


Fig.8 Orbits of the velocity of top floor.



(a) X-direction,



(b) Y-direction,

Fig.9 Relation between the wind velocity and the velocity response of the top floor.

4. まとめ

本報で実大レベルのアクティブフィンシステムの強風時における効果検証を行った。その結果、構造物の速度応答に関して、風向と直角方向であるX方向には制御による応答値の低減効果が見られるが、風向と同一方向であるY方向には効果が見られなかった。今後、制御アルゴリズム等の見直しを行い、より効果的なアクティブフィンシステムを開発してゆく予定である。

謝 辞

アクティブフィン制振装置は大阪大学建築学教室井上研究室の発案によるのもで、その実用化にあたっての研究開発を五洋建設と大阪大学が共同で実施しているものである。制振実験棟による実大構造物での実験にあたって、同研究室と共同実施したものである。また、本論文のとりまとめにあたって同研究室の皆様の多大なご指導、ご支援を賜りました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 向井洋一他、「アクティブフィン制振システムによる風振動の制御」、第42回応用力学連合講演会講演予稿集、1993年1月。
- 2) 氏本育史他、「アクティブフィンシステムによる構造物の風制振 その1～その2」、日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集、B構造I、1993年9月。
- 3) 向井洋一他、「アクティブフィンを用いた構造物の風振動制振システムの検証」、日本建築学会近畿支部報告集、第34号構造系、1994年6月。

- 4) 網島直彦他、「アクティブフィンを用いた構造物の風振動制振に関する実験的研究 その1」、日本建築学会大会(東海)学術講演梗概集、B構造I、1994年9月
- 5) 清水欽也他、「制振実験棟による振動制御実験(その1)実験棟の建設と動特性の確認」、五洋建設技術研究所年報、VOL.24、1994年。