

特集 「快適な都市環境をめざして」

制振装置による風振動環境の改善効果



奥田 浩文



石川 理都子



吉田 治



蔭山 満

Improvement of Wind Vibration Environment using Control Devices

Hirofumi Okuda Ritsuko Ishikawa Osamu Yoshida Mitsuru Kageyama

Abstract

Super-high-rise buildings and tower structures are required to provide high habitability against frequency occurring wind in addition to strong wind resistance. To assess this issue, the authors have developed vibration control devices and practically applied them to full-scale structures.

This paper discusses the performance of the vibration control devices, Hybrid Mass Damper “AVICS[®]” and Tuned Liquid Column Damper “MOVICS[®]”, based on their wind observation records.

概要

近年、建築空間の高付加価値化・高機能化に対する社会的要求が益々厳しくなる状況にあって、超高層の住宅やオフィスビル、あるいは各種タワー・空港管制塔などには、耐風安全性の向上のみならず、発生頻度の高い強風を対象とした居住性の向上が求められている。このような背景から、強風に対する建物応答を積極的に抑制し、より快適な空間を構築することを目的とした各種制振装置が実建物に適用されている。筆者らも建物頂部設置型の制振装置を実建物に適用し、その有用性を確認してきた。本論では、実適用したハイブリッド型制振装置「AVICS[®]」およびパッシブ型制振装置「MOVICS[®]」の有用性、すなわち強風時の居住性改善効果を、建物竣工時から計測してきた数多くの風観測記録に基づいて検証する。

1. はじめに

最近の建築物には、地震や強風に対する高度な安全性保持・機能維持、さらにはより快適な居住性などが求められている。高度情報化ビル、超高層の住宅・オフィスビル、各種タワー・空港管制塔など、構造安全性に加えて居住性が建物性能の主要部分を決定するような建築物では、この種の要求は特に強い。このような背景から、多くのビルで風揺れによる居住性を検討するケースが増加し、同時に制振装置の設置などによる対策が講じられている。

筆者らも、アクティブ、ハイブリッドタイプに大別される外部エネルギー供給型の制振装置「AVICS」を計6物件に、パッシブタイプの流体式制振装置「MOVICS」を計5物件にそれぞれ適用し、その有用性を確認してきた^{1)~4)}。

本論では、これら実建物に適用した「AVICS」、「MOVICS」の有用性、すなわち強風時の居住性改善効果を、建物竣工時から継続してきた数多くの風観測記録を対象として検証する。

2. 適用建物と装置の概要

2.1 適用建物の概要

制振装置を適用した計11物件のうち、「AVICS」^{1),2)}および「MOVICS」^{3),4)}を適用した建物、それぞれ2物件ずつを抽出し、風観測記録に基づく居住性改善効果を検証する。適用建物の概要をTable 1に一括して示す。いずれの適用建物も高さ100m以上の超高層であり、また、その形状と周辺環境とから、強風に対する居住性の向上が求められた物件である。

2.2 装置の概要

適用建物に設置されているそれぞれの装置概要をTable 1に一括して示す。建物A-1、A-2には「AVICS-2」^{1),2)}が、建物M-1には「MOVICS-1」³⁾が、建物M-2には「MOVICS-2」⁴⁾がそれぞれ設置されている。この種の装置(建物頂部設置型制振装置)では、稼働マスが大きいほど、あるいは稼働マスを大きく駆動させるほど、より大きな制振性能を得ることが可能となる。同表の「装置の概要」欄に示す通り、

質量比(建物基本モード質量に対する装置総質量の比率)は、いずれの建物においても1%前後に設定されている。

「AVICS-2」はACサーボモータとボールねじで駆動するAMD(Active Mass Damper:「AVICS-1」)を、多段積層ゴムで支持されるTMD(Tuned Mass Damper)上に搭載する形で構成されている。この方式のHMD(Hybrid Mass Damper)は、日常風に対しては、供給エネルギーを必要としないTMDとして機能し、台風などに対しては、建物応答レベルに応じてTMDからHMDに滑らかに移行することが可能な装置であり、常時のランニングコストの低減に繋がる等の特長を有する。また、供給エネルギーによって稼働マスを大きく稼働させることが可能な装置であるため、より大きな制振性能を達成できる装置となる。なお、水平2方向の方向別の制御は、多段積層ゴムの各段に設置された周期調整用ばねの着脱によって実現している。

「MOVICS」は大型水槽内の水を稼働マスとした水平2方向周期の独立調整が可能な、供給エネルギーを必要とし

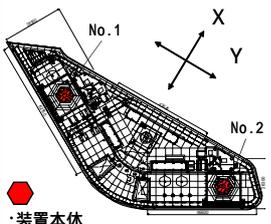
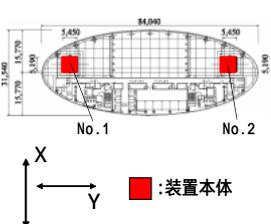
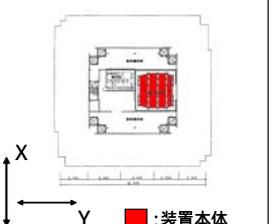
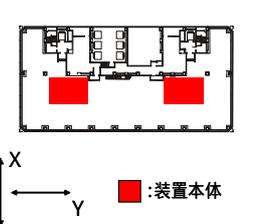
ない制振装置(TLCD:Tuned Liquid Column Damper)で、水槽内の水を消火用水や非常用設備用水として有効利用できるという特長を有する。「MOVICS-1」と「MOVICS-2」の違いは周期調整方法の差異にあり、前者ではコイルばねにより水の動きを制御することによって、後者では水槽立ち上がり部の断面積を適宜変更することによって、それぞれ最適な周期調整(建物と装置との同調)を実現している。

なお、実建物に適用する際の「AVICS」、「MOVICS」の選択は、当該建物に求められる制振性能(どの程度の付加減衰を与えるか)と、当該建物で許容できる装置設置スペースとのトレードオフによって決定される。

2.3 目標性能

各装置の設置主目的は、Table 1の「制振性能」欄に示す通り、いずれの場合も強風(再現期間1年時)による水平方向の建物応答を居住性能評価指針(91年版)⁵⁾のランク

Table 1 適用建物と装置の概要
Outline of Applied Buildings and Control Devices

		建物 A - 1	建物 A - 2	建物 M - 1	建物 M - 2
適用建物の概要	所在地	東京都	東京都	大阪府	東京都
	用途	事務所・店舗 他	事務所・店舗 他	ホテル・店舗 他	事務所・店舗 他
	竣工年	2003年	1998年	1994年	2003年
	構造形式 [地上部]	S	S	S	S
	地上階数	48階	32階	28階	29階
	最高高さ	211.0m	145.0m	112.4m	144.05m
	実測基本周期 (設計基本周期)	X 5.29秒(6.21秒) Y 4.12秒(4.77秒)	X 3.87秒(4.05秒) Y 3.33秒(3.80秒)	X 1.96秒(2.97秒) Y 1.92秒(2.86秒)	X 3.40秒(3.93秒) Y 3.00秒(3.83秒)
装置本体の 設置位置					
装置の概要	制御方式	AVICS-2 [HMD]	AVICS-2 [HMD]	MOVICS-1 [TLCD]	MOVICS-2 [TLCD]
	設置基数	2	2	1	2
	稼働マス質量 [1基当たり]	HMD:220.0ton (AMD:20.0ton,TMD:200.0ton)	HMD:75.0ton (AMD:7.5ton,TMD:67.5ton)	TLCD:81.7ton	TLCD:86.0ton
	装置総質量/ 建物基本モード質量	0.99%	0.89%	0.54%	1.20%
制振性能	居住性能評価 [再現期間1年]	X ランク (H-3)以内 [最上階加速度:4.86cm/s ² 以内]	X ランク (H-3)以内 [最上階加速度:4.12cm/s ² 以内]	X ランク (H-2)以内 [最上階加速度:2.30cm/s ² 以内] Y ランク (H-2)以内 [最上階加速度:2.25cm/s ² 以内]	X ランク (H-3)以内 [最上階加速度:3.84cm/s ² 以内] Y ランク (H-3)以内 [最上階加速度:3.69cm/s ² 以内]
	減衰性能 [非制振 制振]	X [実測値] 0.77% 12.70% (付加減衰:11.93%) Y [実測値] 1.15% 3.59% (付加減衰: 2.44%)	X [実測値] 0.65% 12.50% (付加減衰:11.85%) Y [実測値] 1.24% 3.81% (付加減衰: 2.57%)	X [設計値] 1.00% 3.00% (付加減衰: 2.00%) Y [設計値] 1.00% 3.00% (付加減衰: 2.00%)	X [設計値] 1.00% 2.50% (付加減衰: 1.50%) Y [設計値] 1.00% 2.50% (付加減衰: 1.50%)

以内に抑制し、居住性を改善することにある。

適用建物毎の、基本周期における目標性能(減衰性能)をTable 1の「制振性能」欄に示す。装置が稼動することにより建物に付加される付加減衰によって、再現期間1年の風が作用した場合の当該建物応答(最上階加速度応答)は、それぞれランク 以内に抑制されることになる。

3. 風観測記録と制振効果の概要

3.1 風観測記録の概要

当該建物竣工時から継続して実施した風観測記録のう

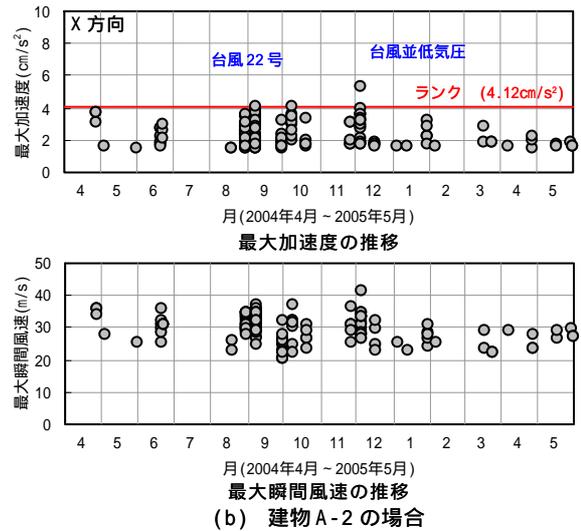
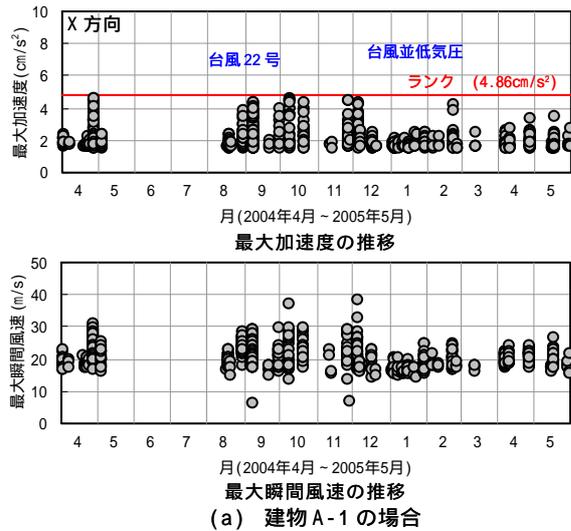


Fig. 1 風観測記録の推移 (「AVICS」の場合)
Transition of Wind Observation Records with AVICS

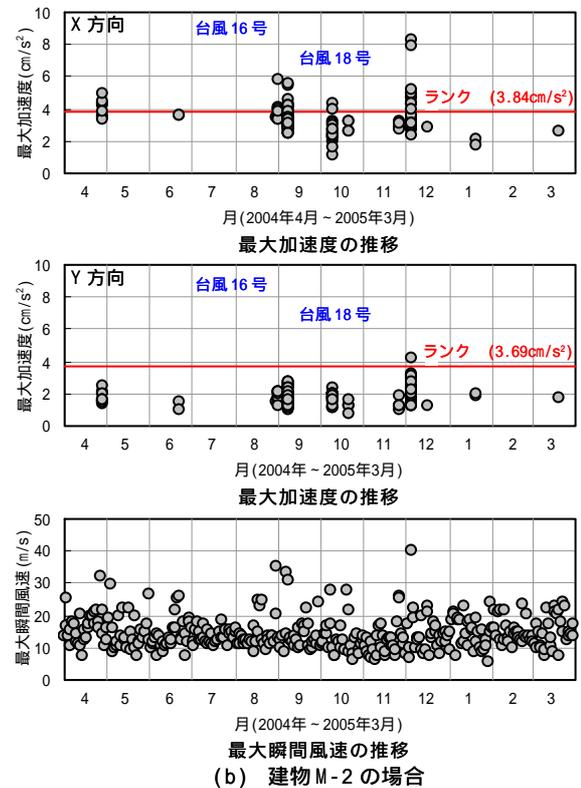
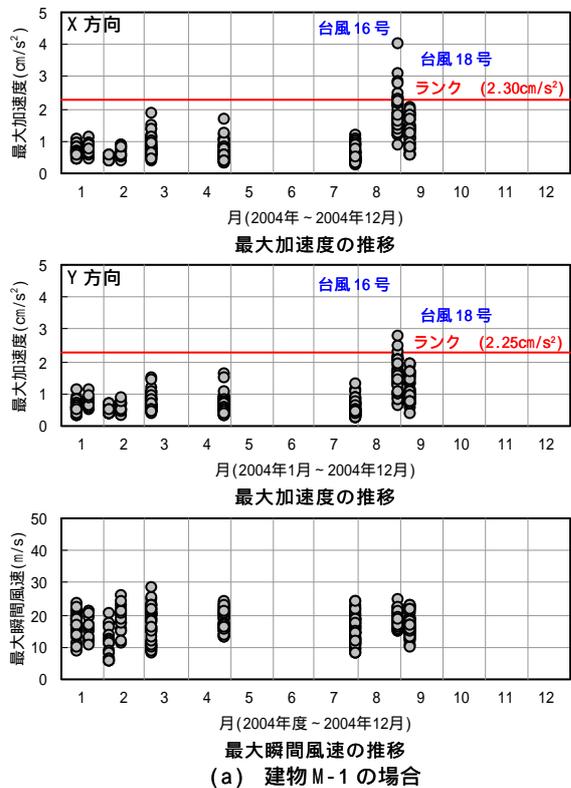


Fig. 2 風観測記録の推移 (「MOVICS」の場合)
Transition of Wind Observation Records with MOVICS

ち、2004年から2005年にかけて得られた結果をFig. 1, 2に示す。Fig. 1が「AVICS」適用建物の結果を、Fig. 2が「MOVICS」適用建物の結果をそれぞれ表す。各図共、観測された、最大加速度と最大瞬間風速の結果(時間的推移)から構成されている。

3.2 「AVICS」適用建物の風観測記録

Fig. 1中の(a)は建物A-1の、(b)は建物A-2の結果をそれぞれ表す。同図(a),(b)の各図共、横軸には風観測期間を採っており、これらは建物竣工時から現在に至る全風

観測期間のうち、2004年4月1日から2005年5月31日までの記録を抜粋した結果である。最大加速度値(建物応答が最も大きくなるX方向を対象)および最大瞬間風速値は、(a)、(b)共、当該建物に設置された加速度計、風向風速計から採取した値を用いている。各図中のプロット部(丸印)は、1)全て「AVICS」が稼動した場合(制振時)の結果、2)装置稼動中の観測記録を10分毎(サンプリング時間0.02秒)に区分けし、その最大値を算出した結果、として表している。なお、(a)、(b)共、最大加速度の結果を表す図には、当該建物基本周期を対象としたランク 相当の加速度値を併記している。

これらの結果から、建物A-2において、最大瞬間風速値が41.6m/sであった台風並低気圧発生(2004年12月5日)時に数十秒間ランク を超過した記録(5.3cm/s²)を除けば、建物A-1、A-2共に「AVICS」によって当初設定した制振性能、すなわち最大加速度値がランク 以内となることを、現状でも継続して満足していることが確認できる。なお、最大瞬間風速値41.6m/sは、再現期間1年時の風速を大きく上回る値であることを付記しておく。

3.3 「MOVICS」適用建物の風観測記録

Fig. 2中の(a)は建物M-1の、(b)は建物M-2の結果をそれぞれ表す。Fig. 1と同様に、同図(a)、(b)の各図共、横軸には風観測期間を採っている。同図(a)の各図は、建物竣工時から現在に至る全風観測期間のうち、2004年1月1日から2004年12月31日までの記録を、同図(b)の各図は、2004年4月1日から2005年3月31日までの記録をそれぞれ抜粋した結果である。最大加速度値は、(a)、(b)共、当該建物に設置された加速度計から採取した値を用いている。また最大瞬間風速値は、(a)の場合、当該建物に設置された風向風速計から、(b)の場合、東京管区気象台の公開データ(日ごとの最大瞬間風速値)から、それぞれ採取した値を用いている。各図中のプロット部(丸印)は、(a)・建物M-1では計測時間を130秒ごととした場合の最大値として、(b)・建物M-2では応答加速度による終了判定を実施しているため、計測時間を約80～980秒ごととした場合の最大値としてそれぞれ表している。なお、Fig. 1と同様に、(a)、(b)共、最大加速度の結果(時間的推移)を表す図には、当該建物基本周期を対象としたランク 相当の加速度値を併記している。

これらの結果から、建物M-1では台風16号(2004年8月30日～31日)時の結果を除いて、当初設定した制振性能であるランク を満足していることが確認できる。

パッシブ型である「MOVICS」の特長のひとつは、外部からのエネルギー供給を必要としない点にあるが、マスを強制稼動させるための動力源を有していないため、竣工直前に実施した装置調整結果の最終確認に際しては、竣工後に襲来する外力を待つなどの待機期間が生じる場合がある。竣工時からの日が浅い建物M-2では、当該期間の風観測記録を分析した結果、竣工直前に実施した装置特性とのずれが確認されたため、2005年3月に装置特性の再調整を実施している。

4. 主な風観測記録の時刻歴波形

4.1 「AVICS」適用建物の場合

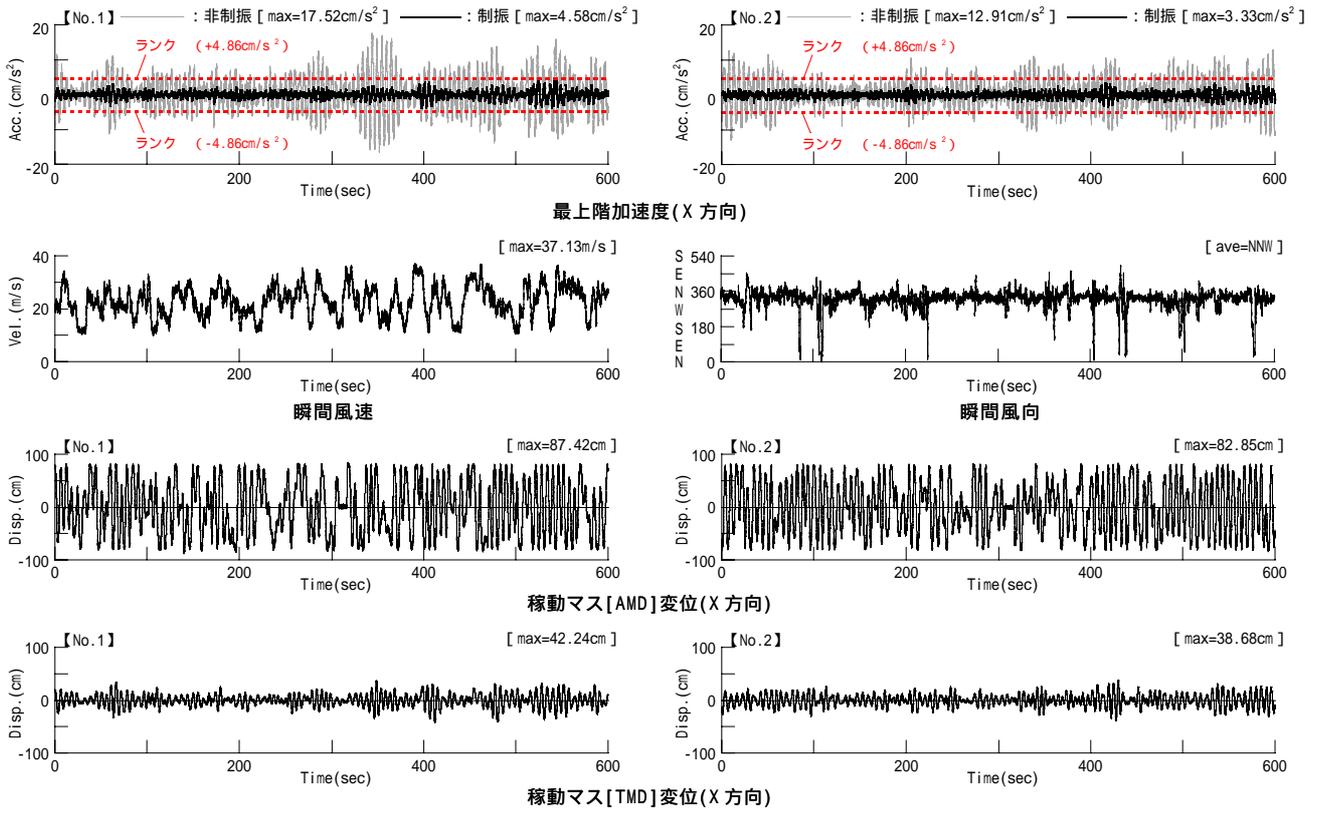
Fig. 1に示す「AVICS」適用建物に関する全風観測記録のうち、建物A-1、A-2共に最上階加速度が最大となった台風22号(2004年10月9日)時の時刻歴波形をFig. 3に示す。ただし、3.2節で示した通り、建物A-2における最大瞬間風速値41.6m/s時の10分間データは除外している。図中、(a)は建物A-1の、(b)は建物A-2の、X方向の結果をそれぞれ表す。(a)、(b)各図には上段から、最上階加速度(制振時)、瞬間風速、瞬間風向の各波形を示している。その下の稼動マス[AMD]変位と稼動マス[TMD]変位の各波形は、制振時の最上階加速度波形(図中、太線)で表される制振性能を得るために稼動した、マスの実測変位を表している。なお、最上階加速度波形には、制振性能を把握するために計算した非制振時の最上階加速度波形(図中、細線)を併記している。非制振時の最上階加速度波形(図中、細線)は、竣工直前の装置調整時に実測した当該建物の動特性を基に作成した解析モデル^{1),2)}を用いて算出した。

最上階加速度波形(制振時と非制振時)の結果から、制振装置が稼動することによって当初設定した制振性能であるランク を満足していることが確認できる。また、非制振時最大加速度応答に対する制振時最大加速度応答の比率(加速度応答低減率)は、建物A-1で26%、建物A-2で33%となっており、当初設定通りの応答低減効果が得られていることも確認できる。

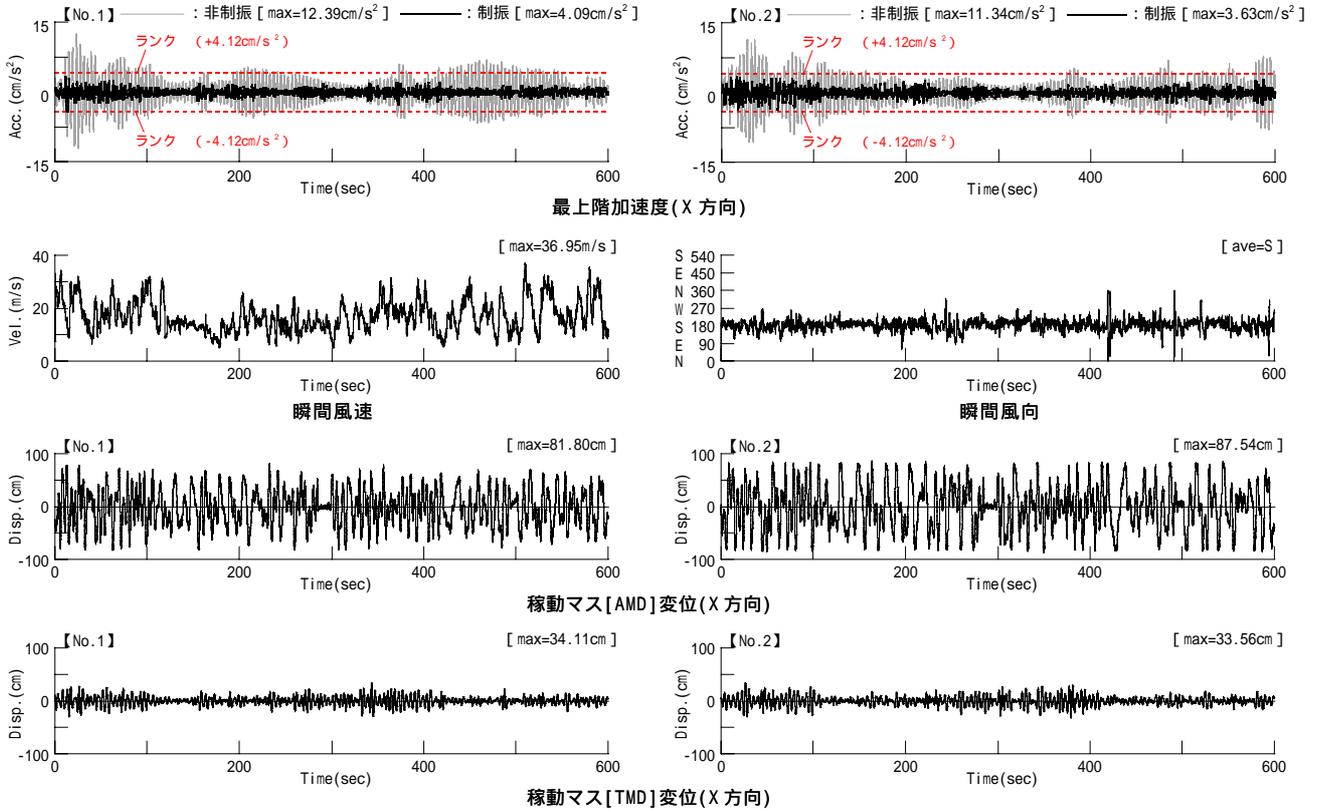
4.2 「MOVICS」適用建物の場合

Fig. 2に示す「MOVICS」適用建物に関する全風観測記録のうち、台風18号(2004年9月7日～8日)時を対象とした波形をFig. 4に示す。図中、(a)は建物M-1の、(b)は建物M-2の、制振時の結果をそれぞれ表している。(a)、(b)各図には、最上階加速度波形(制振時)と、当該波形からRD法⁶⁾により作成した自由振動波形とを示す。なお、各自由振動波形には対数減衰率法により算出した減衰定数を併記している。

同図(a)・建物M-1の自由振動波形の結果から、制振時の減衰定数は3.89%(X方向)、3.21%(Y方向)となり、当初設定した制振性能(減衰性能)を満足する結果となっていることが確認できる。同図(b)・建物M-2の結果には、竣工直前の「MOVICS」が最終調整されていない状態での風観測記録(2003年1月15日の風観測記録を使用)から算出した自由振動波形と減衰定数を、非制振時の結果として併記している。各方向の減衰定数は、X方向で1.51%から3.86%に、Y方向で2.93%から6.90%にそれぞれ大幅に改善され、且つ当初設定した制振性能(減衰性能)を満足する結果となっていることが確認できる。また、強風時の建物応答(例えば加速度応答)は概ね、減衰定数の平方根に反比例することを勘案すると、装置が稼動することによる建物M-2の加速度応答低減率(非制振時最大加速度応答に対する制振時最大加速度応答の比率)は、40%近い値になっていると推定される。



(a) 建物 A-1 の時刻歴波形



(b) 建物 A-2 の時刻歴波形

Fig. 3 風観測結果例 (台風22号 2004.10.9)
Example of Wind Observation Records (Typhoon No.22 October 9, 2004)

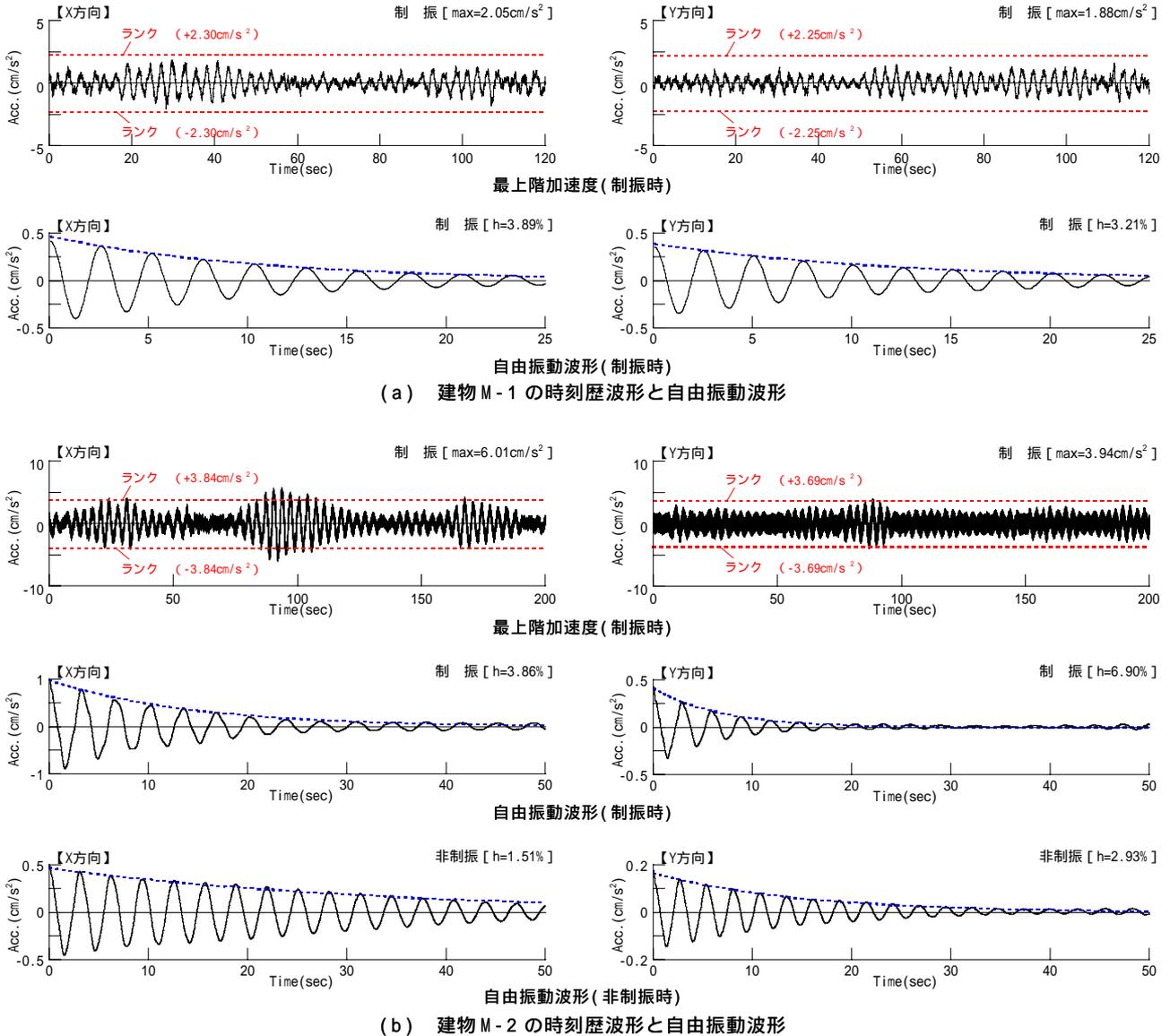


Fig. 4 風観測結果例 (台風18号 2004.9.7)
Example of Wind Observation Records (Typhoon No.18 September 7, 2004)

5. おわりに

建物頂部設置型の制振装置を適用した4物件を対象に、風観測記録の概要と主な観測時刻歴波形について報告した。これらの結果から、「AVICS」および「MOVICS」は、当初設定した「居住性能評価指針のランク（再現期間1年時の風を対象）を満足する」という制振性能を竣工時から継続して達成していることが検証された。

参考文献

1) 蔭山, 奥田, 稲葉, 中村, 小林: ハイブリッド型動吸振器の開発とその実機適用に関する研究(その1)~(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.811 ~ 818, (2000)

2) 奥田, 蔭山, 山中, 勘坂, 福井: (仮)電通新社屋建設プロジェクト(その12), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.655 ~ 656, (2003)

3) 寺村, 川口, 吉田, 岡田, 安井: 流体式制振装置(MOVICS)を付与した高層建物の動特性, 大林組技術研究所報, No. 50, pp.1 ~ 8, (1995)

4) 石川, 寺村, 藤田: 流体式二方向制振装置 MOVICS の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.673 ~ 674, (2002)

5) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針 同解説, (1991)

6) 田村, 佐々木, 塚越: RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 454, pp.29 ~ 38, (1993)