

空圧式とピエゾ式のアクティブ除振装置の除振，制振性能に関する考察

特許機器株式会社 技術開発部 開発部
三浦 享博

2020年6月

概要

空圧式除振装置は柔らかいバネをもち、アクティブ除振制御技術と組み合わせることで広い周波数帯域で精密機器を床振動から絶縁することができる。空圧式除振装置を縦に2段重ねたとき、固有モードの連成の影響による除振性能の劣化を指摘する主張があるが、その劣化現象は制御技術により十分に回避可能であり、その結果、除振性能をさらに強化できる。他にも、ピエゾ式の除振装置に比べバネ上の偏荷重に対する位置、姿勢維持性能に優れるなどの利点もあり、空圧式アクティブ除振装置は適用範囲の広い除振装置である。本稿では代表的なアクティブ除振装置である空圧式アクティブ除振装置とピエゾ式除振装置の特徴についてシミュレーションを交えながら述べる。

1. 序論

空圧式アクティブ除振装置は精密機器を床から絶縁するための装置として広く使用されており、高周波域は柔らかいバネの物理的性質により、低周波域はアクティブ制御により広い周波数帯域で床振動を絶縁することが可能である。

空圧式パッシブ除振装置の下に空圧式アクティブ除振装置を設置すれば、その除振性能はさらに強化される。固有周波数の近い2つ空圧式除振装置を縦に重ねた場合、固有モードの連成による除振性能の劣化を指摘する主張が存在するが、その現象は特許機器の制御技術により全く問題ないレベルまで低減できる。

アクティブ除振装置上加わる外乱(音圧、ステージ動作)に対する制振性能について考える。空圧式アクティブ除振装置はそのアクティブ制御方式により速やかにその振動を制振することができる。他の代表的なアクティブ除振装置として挙げられるピエゾ式アクティブ除振装置は固有周波数以下の周波数成分をもつ外乱に対しては空圧式より優れた制振性能を有する一方で、固有周波数近傍の制振性能は大きく劣化する。また、除振台上積載物の偏重心による傾きをピエゾ式アクティブ除振装置は補正することができない。

高周波域の除振制御について考える。空圧式アクティブ除振装置は柔らかいバネの物理的性質を利用できるため除振に必要な制御力は高周波域では小さい。一方で、ピエゾ式アクティブ除振装置は空圧式より硬いバネをもつため空圧式と同等程度までの除振性能を出すために空圧式に比べ数倍以上の制御力が必要である。高周波領域は設置床、積載装置共に複数の弾性体モードが存在し、その弾性モードはアクティブ制御により励起されやすい。それゆえ高周波領域の除振性能がアクティブ制御力に大きく依存するピエゾ式アクティブ

除振装置は設置床や搭載装置の弾性モードの影響を受け、除振性能が劣化しやすい。

前述したように特許機器の空圧式アクティブ除振装置はそのアクティブ制御手法によりピエゾ式アクティブ除振装置に比べ多くの優れた利点をもち、様々な環境で広く使用されている。本稿では空圧式とピエゾ式の除振装置の構造や制御方式に基づく特徴の違いについてシミュレーションを交えながら以下に詳しく述べる。

2. 特許機器の空圧式アクティブ除振装置の概念

2.1. 空圧式アクティブ除振装置の構造と制御手法

特許機器の空圧式アクティブ除振装置の概略図を Fig. 1 に示す。除振装置内蔵の加速度センサ及び変位センサにより、除振装置の位置、姿勢を一定に維持しつつ除振制御を行う。さらに特許機器では座標制御方式を導入している。これは、各除振ユニットごとのセンサ測定値を除振装置上負荷全体の並進と回転の自由度に変換し、その自由度毎に制御を行う方式である(Fig. 2)。この手法により並進と回転の制御を別々に行うことができるようになる。その効果の一つとして Fig. 3 で示すように転倒方向を硬くすることにより搭載物が高重心であっても姿勢を一定に保ちながら、鉛直、水平方向を柔らかくすることにより除振性能を向上させる制御が可能となる。

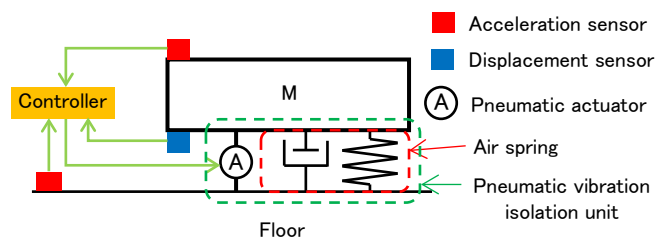


Fig. 1 特許機器の空圧式アクティブ除振装置の制御方式

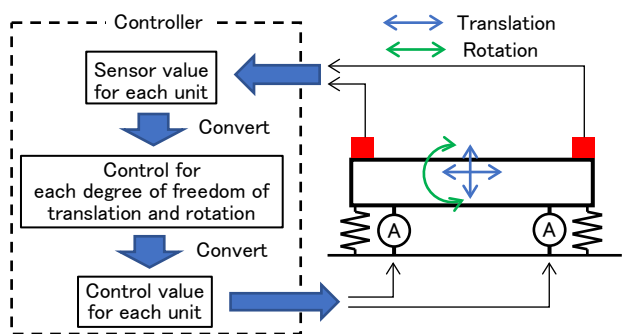


Fig. 2 特許機器の空圧式アクティブ除振装置制御方式

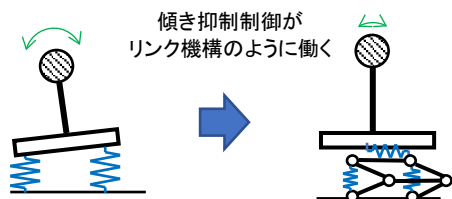


Fig. 3 傾き抑制制御のイメージ図

2.2. 空圧式パッシブ除振装置 + 空圧式アクティブ除振装置システムによる除振効果について

この節では、空圧式パッシブ除振装置の下に固有周波数の近い空圧式アクティブ除振装置を設置した場合でも、アクティブ制御により広帯域にわたって高い除振性能を得られることを単純な1次元シミュレーションを用いて示す。

2段階除振システムのシミュレーションモデルを Fig. 4 に示す。M1 は搭載装置内蔵の除振ユニットにより支持されている負荷、M2 は搭載装置のフレーム及び下側除振装置により支持されている設置用定盤を表す。Fig. 1 で示すように空圧式除振装置は複数種類のセンサにより制御されているが、問題の単純化のためにここではバネ上の加速度信号からアクチュエータへのフィードバック制御に限定して考察する。シミュレーション条件として、質量比(MR = M2/M1)は 1.0, 上側除振台の固有値を 1.8Hz, 下側除振装置の固有値を 2.0Hz とする。

シミュレーション結果を Fig. 5 に示す。図の上側が床から上側除振装置上までの振動伝達特性、下側が床から下側除振装置上までの振動伝達特性を表している。図より、加速度制御制御を行わないパッシブ状態では2つの除振装置の近接する2つの固有モードの連成により1から4Hzの除振性能が劣化しているが、アクティブ制御により全く影響のないレベルまで改善されており、結果として広帯域で高い除振特性を達成できていることが分かる。

Fig. 6 に質量比 (MR) を変化させたときの床から上側除振台

までの振動伝達特性を示す。アクティブ除振装置がパッシブ状態のときは質量比の増加と共に固有値近傍の除振特性が劣化しているが、制御状態がアクティブのときは質量比が増加しても除振特性は劣化しない。

シミュレーションモデルを2次元以上へ拡張した場合は、並進と回転の自由度に連成が存在するため、このような単純な制御手法だけで除振性能を向上させることは難しいが、特許機器では前節で述べたように並進と回転の自由度を個別に制御することでこの連成問題を解決している。

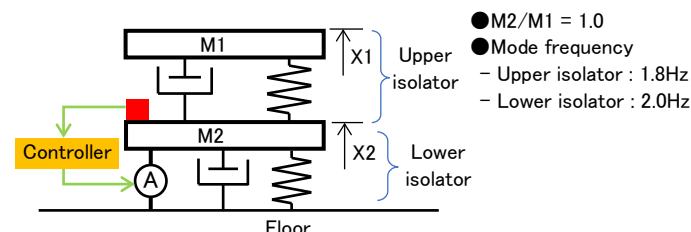


Fig. 4 2段階空圧除振システムの1次元モデル

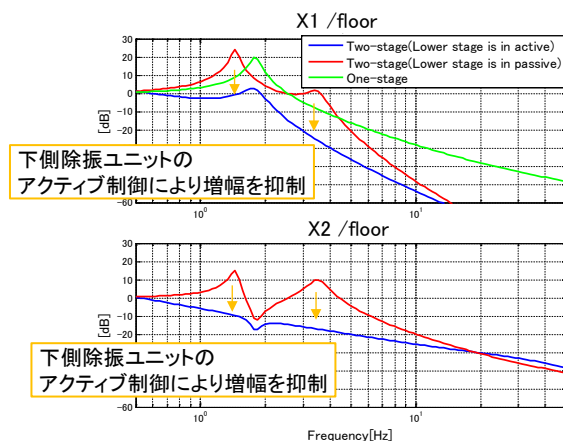


Fig. 5 2段階空圧除振システムの除振特性

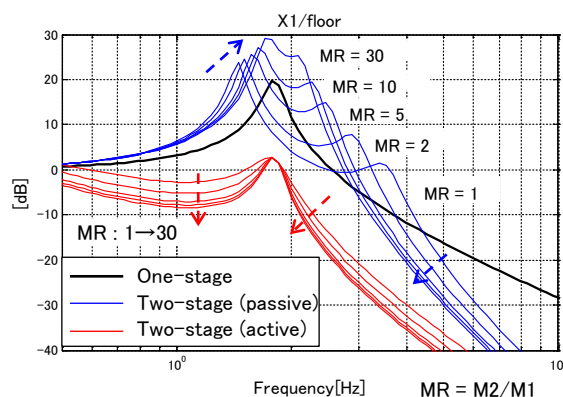


Fig. 6 質量比を変化させたときの除振特性(X1/floor)

2.3. 1Hz 以下の除振制御

1Hz 以下の除振は一般的に難しいとされているが、特許機器のアクティブ除振装置はその制御技術により、搭載装置が高重心であってもその困難さを克服できることを実験例から示

す。

空圧式除振装置に高重心の物体を搭載した時(Fig. 7)の除振特性を Fig. 8 に示す。高重心の影響によりパッシブ時の固有モードが 1Hz に存在し、その周波数近傍の振動を増幅しているが、アクティブ制御により水平、鉛直方向ともに 0.4Hz から除振できていることが分かる。

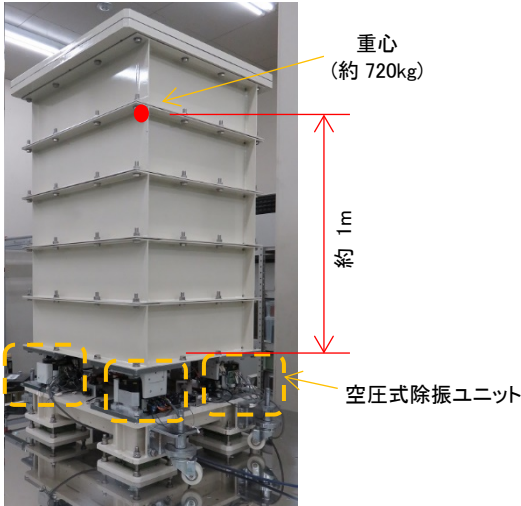


Fig. 7 1Hz 以下の除振実験風景

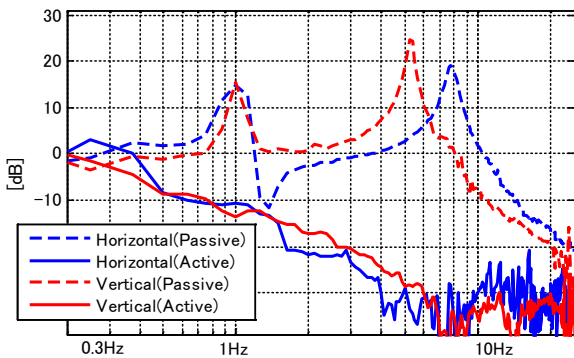


Fig. 8 除振特性

3. ピエゾ式アクティブ除振装置の概要

代表的なピエゾ式アクティブ除振装置の概略図を Fig. 9 に示す。図中、M は除振装置上の搭載物、m は除振ユニット内蔵の中間マス(数 kg 程度)を表す。m の上部にエラストマーが配置されており、その上部に定盤及び搭載装置を設置する。ピエゾ式アクティブ除振装置の固有値は空圧式除振装置より数倍大きい。固有値が高い利点として、非制御(パッシブ)時でもバネ上搭載装置が傾斜しにくく、姿勢が安定しやすいことが挙げられる。一方で、Fig. 10 に示す様に高周波数領域まで強い制御力を及ぼさないと空圧式と同程度の除振性能を達成することができない。

制御方式については M 及び m 上の加速度、絶対速度センサ信号からピエゾアクチュエータへのフィードバック制御が考えられる。M 上のセンサ信号によるフィードバック制御は搭載装置の弾性モードの影響を大きく受けるため、高周波領域で強い制御力が必要であるピエゾ式アクティブ除振装置では制御が難しくなり実用化が難しい。一方、m 上のセンサ信号によるフィードバック制御はエラストマーの振動絶縁効果により搭載装置の弾性モードの影響を受けにくい。実際に m 上の測定値のみによるフィードバック制御が商用のピエゾ式除振装置の制御方式として一般的である。

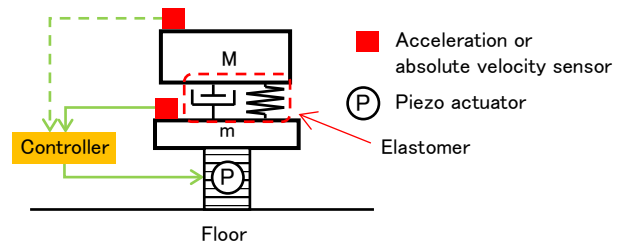


Fig. 9 ピエゾ式アクティブ除振装置の概略図

a

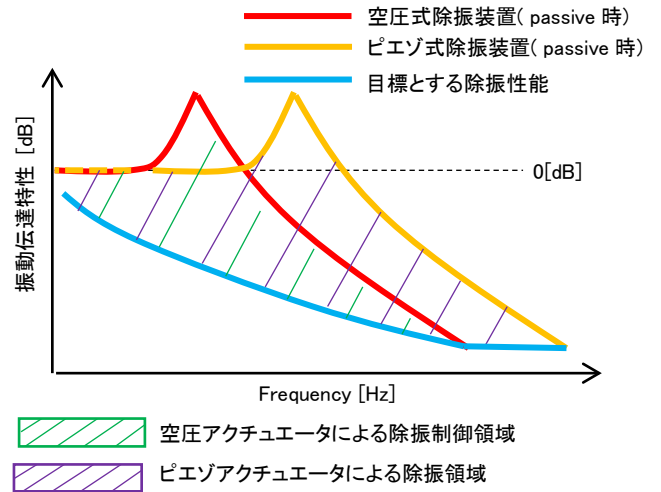


Fig. 10 各除振装置における除振制御必要な周波数領域

一般的なピエゾ式アクティブ除振装置は高周波域における制御の困難さ以外に以下のデメリットが挙げられる。

- ・定盤上の直動外乱による制振性能はエラストマーの物理的性能に大きく依存する。直動外乱が除振装置の固有値近傍の周波数成分をもつ環境ではその振動が増幅されやすい。
- ・除振装置上負荷の偏荷重による搭載装置の傾斜をピエゾアクチュエータにより補正することができない(Fig. 11)。また、除振に用いられる一般的なエラストマーは初期負荷時に数

mm, 数十から数百時間かけて数十から数百 μm クリープする。このオーダーの傾斜が重要になる場合は除振装置の運用に注意が必要である。

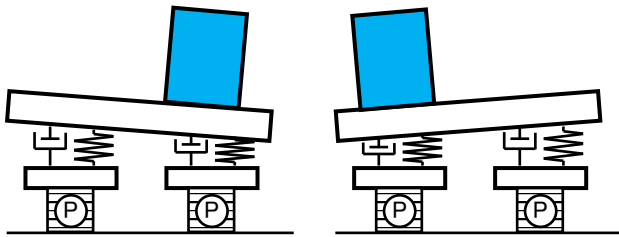


Fig. 11 偏重心負荷のために傾く
 ピエゾ式アクティブ除振装置上の装置

3.1. 固いばねを持つアクティブ除振装置による高周波領域除振制御の困難さについて

空圧式アクティブ除振装置はその柔らかいバネの物理的特性により高周波域において高い除振性能を持つ。そのため、この周波数領域で強い制御力を必要としない。ピエゾ式アクティブ除振装置のようにバネを硬くした場合、高周波域で空圧式と同等の除振性能を得るには強い制御力が必要となる。除振装置バネ上の搭載物及び設置床が十分な剛性をもっていれば、高周波数領域においても問題なく強い制御力が作用できるが、微振動領域ではいずれも弾性体とみなすべきであり、その固有振動モードは高周波数領域に多く存在する。除振装置と床の設置状態もマイクロメートルオーダーの視点では隙間が存在し Fig. 12 のように無数の弾性モードが存在する。なお、設置の隙間による弾性モードは床平面度の改善、及びボルトによる除振ユニットの固定により低減もしくはさらに高い周波数領域へ移動させることができる。

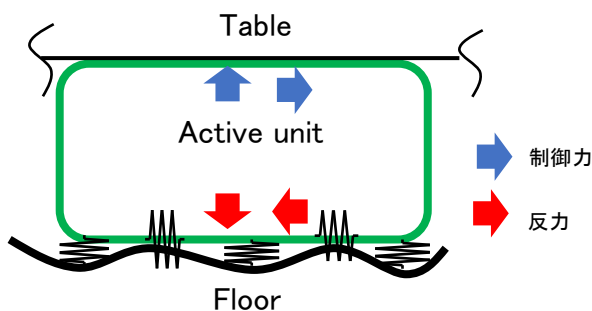


Fig. 12 マイクロメートルオーダーで見た Active 除振装置と床の設置状態

除振装置の制御対象である剛体モードと弾性モードの例について Fig. 13 に示す。Fig. 13(a) で代表される剛体モードは除振装置上の物体を剛体とみなしたときの振動モードでその形状は単純である。Fig. 13(b) で代表される弾性モードは除振

装置上の物体や設置床などが変形した時の振動モードで複雑な形状になり、剛体モードより高周波数領域に無数に存在する。

剛体モードは単純な形状のため、限られた数のセンサ、アクチュエータで観測可能かつ振動制御可能である。アクティブ除振装置は空圧式、ピエゾ式共にこの剛体モードの制御を行う。一方、弾性モードは限られた数のセンサ、アクチュエータでは正確に観測できず、除振制御により逆に弾性モードを励起してしまう場合も多い。ゆえに、複数の弾性モードが存在する高周波領域では、センサとアクチュエータによる制御を必要とせずバネの物性のみ依存するパッシブ方式の方が高い除振性能を得やすい。Fig. 14 に弾性モードが除振性能に与える影響を図示する。弾性モードの影響がない場合は、除振装置の固有値にかかわらず高周波領域までアクティブ制御により高い除振性能を達成できる。しかし、弾性モードの影響が大きい場合、その帯域では適切な制御ができないため除振性能が劣化する。特にピエゾ式アクティブ除振装置で代表されるバネの硬い除振装置は高周波域に強い制御力が必要なため弾性モードによる影響を大きく受ける。

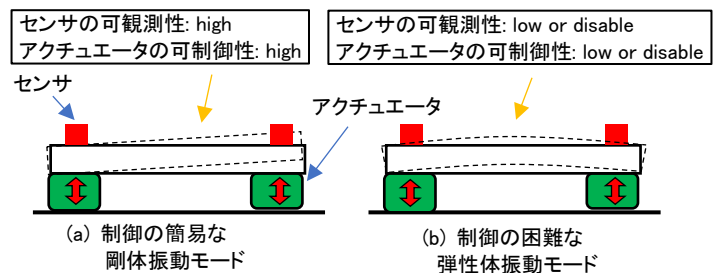


Fig. 13 振動モード形状による制御の難易度の違い

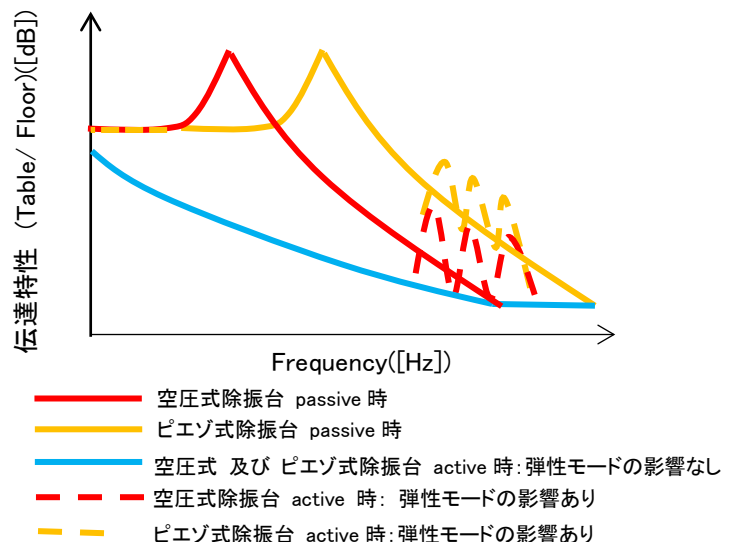


Fig. 14 弾性モードが除振性能に与える影響

4. 2 段式除振システムの 2D シミュレーション

この節では空圧式アクティブ除振装置の上に空圧式除振ユニットを内蔵する高重心な装置を搭載した場合、除振、制振性能ともに優れた性能を示すことをシミュレーションにより示す。高重心装置の転倒しやすさに対する影響を考察するため、シミュレーションモデルを並進と回転の自由度を持つ 2 次元に拡張する。搭載装置は電子顕微鏡などのように内部にエア除振ユニットを内蔵した高重心の装置を想定している。シミュレーションモデルの概略図を Fig. 15 に、シミュレーションで用いたパラメータを Table 1 に示す。空圧式アクティブ除振装置の固有周波数は特許機器で標準的なユニットを想定し 5Hz とした。また、比較対象として用いたピエゾ式アクティブ除振装置の固有値を 15Hz とした。

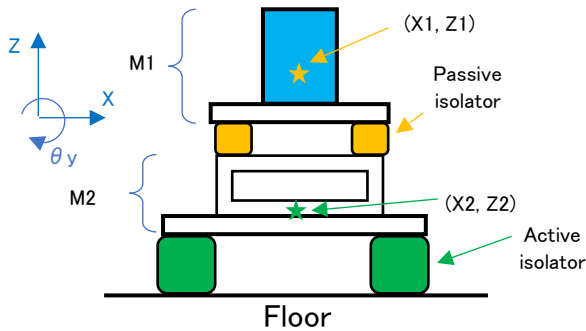


Fig. 15 2 段式除振システムの 2 次元シミュレーションモデル

Table 1 シミュレーションパラメータ(Fig. 15)

		Pneumatic active	Piezo active
Active isolator	Eigen frequency ^{*1}	5 [Hz]	15 [Hz]
	Damping ratio	0.05	0.15
	Coordinate of each unit	(x, z): (-0.5, -0.1), (-0.5, -0.1) [m]	
Passive isolator	Eigen frequency	2 [Hz]	
	Damping ratio	0.1	
	Coordinate of each unit	(x, z): (-0.5, 0.8), (+0.5, 0.8) [m]	
M1	Weight	1000 [kg]	
	Center of gravity	(x, z): (0, +1.0) [m]	
M2	Weight	1000 [kg]	
	Center of gravity	(x, z): (0, -0.05) [m]	
Measurement point (X1, Z1)		(0.0, +1.0) [m]	
Measurement point (X2, Z2)		(0.0, 0.0) [m]	

*1: バネ上がすべて剛体と仮定した時の値。

4.1. 除振特性

床からパッシブ除振ユニットバネ上(X1, Z1)及びアクティブ除振装置バネ上(X2, Z2)までの振動伝達特性を Fig. 16, Fig. 17 に示す。Fig. 16 は空圧式アクティブ除振装置, Fig. 17 はピエゾ式アクティブ除振装置による結果である。制御パラメータは床からアクティブ除振装置バネ上までの伝達特性が同程度

になるようにそれぞれ現実的なレベルまで調整した。

図中, パッシブ時(Active off)のアクティブ除振装置の固有値が Table 1 表示値より大きくなっている理由は, 搭載装置内のバネ要素(パッシブ除振ユニット)が影響を与えているためである。

結果より, アクティブ除振台上の搭載物が空圧式除振ユニットを内蔵する高重心装置であっても, エア式, ピエゾ式にかかわらず水平(X), 鉛直(Z)方向共に優れた除振性能を達成できていることが分かる。

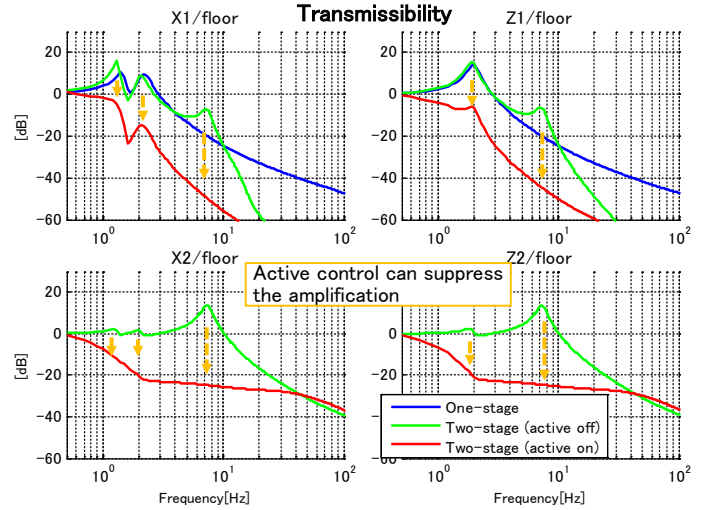


Fig. 16 2 段式除振システムによる除振性能 (空圧式アクティブ除振装置)

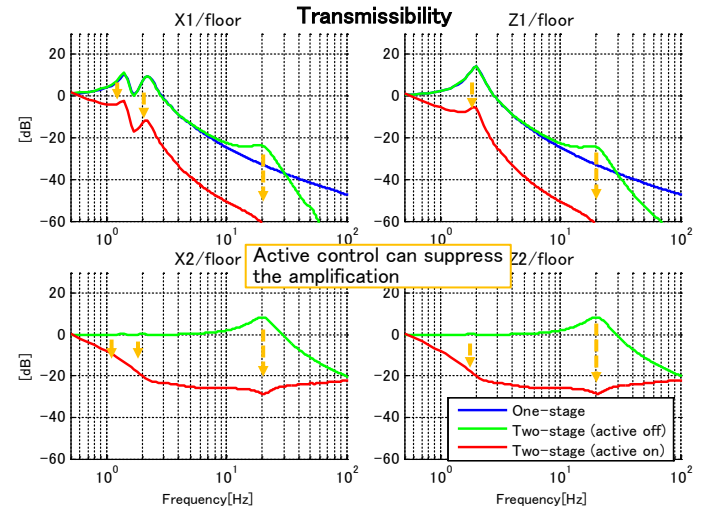


Fig. 17 2 段式除振システムによる除振性能 (ピエゾ式アクティブ除振装置)

4.2. 除振装置上直動外乱に対する制振性能

前節 4.1. と同じ制御状態の時, Fig. 18 のようにパッシブ除振ユニットバネ上及びアクティブ除振装置バネ上に直動外乱を入力した時の制振性能をシミュレーションで評価する。直動外乱は加振時間 0.1s, 最大 1[N]の矩形波を用いる。

シミュレーション結果を Fig. 19~Fig. 22 に示す。それぞれの

図における直動外乱とアクティブ除振装置の組み合わせを Table 2 に示す。Fig. 19, Fig. 21 より、空圧式アクティブ除振装置はアクティブ制御により速やかに外乱の影響を制振できていることが分かる。Fig. 20, Fig. 22 よりピエゾ式アクティブ除振装置の制振性能はアクティブ制御の有無にかかわらず一定であることが分かる。これは前節 3 で述べた通り、ピエゾ式アクティブ除振装置上の直動外乱に対する制振性能は内部エラストマーの物理的性能に大きく依存するためである。

Table 2 シミュレーション結果の図番号表

直動外乱	アクティブ除振システム	
	空圧式	ピエゾ式
f1	Fig. 19	Fig. 20
f2	Fig. 21	Fig. 22

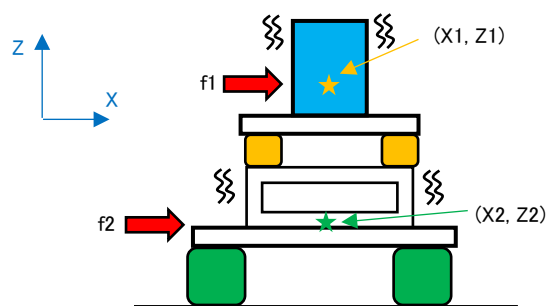


Fig. 18 直接外乱を受ける 2 段階式除振システム

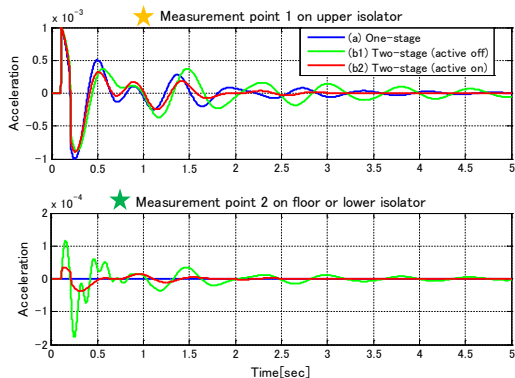


Fig. 19 パッシブ除振ユニットパネ上に外力 f_1 が加わったときの加速度応答(X 方向) (空圧式アクティブ除振装置)

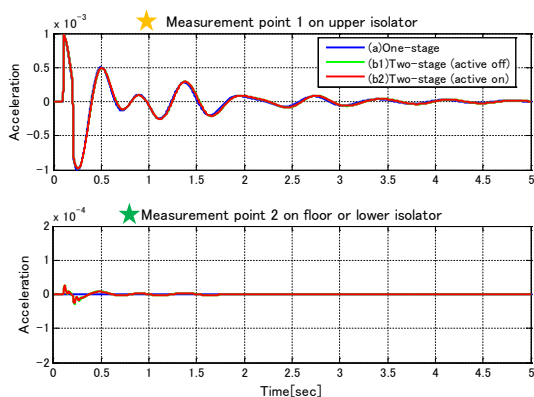


Fig. 20 パッシブ除振ユニットパネ上に外力 f_1 が加わったときの加速度応答(X 方向) (ピエゾ式アクティブ除振装置)

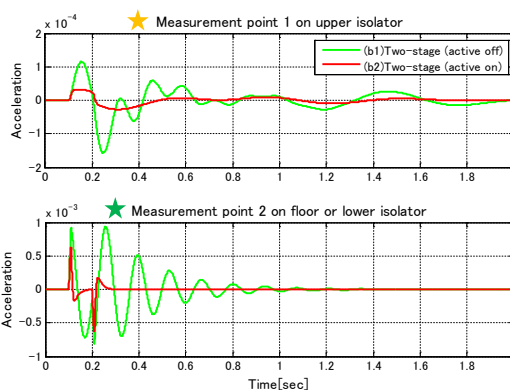


Fig. 21 アクティブ除振装置パネ上に外力 f_2 が加わったときの加速度応答(X 方向) (エア式アクティブ除振装置)

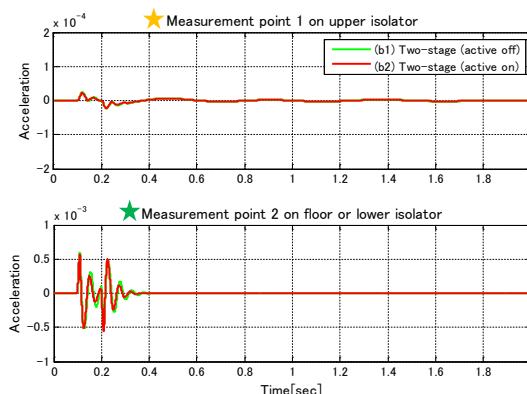


Fig. 22 Active 除振装置パネ上に外力 f_2 が加わったときの加速度応答(X 方向) (ピエゾ式アクティブ除振装置)

5. ステージ移動時の制振性能

この節では、空圧式とピエゾ式アクティブ除振装置上をステージが移動した時の影響を 2 次元シミュレーションモデルにより比較評価する。搭載装置は半導体露光装置を想定している。シミュレーションモデルの概略図を Fig. 23 に、シミュレーションで用いたパラメータを Table 3 に示す。表中、アクティブ除振装置のパラメータは前節 4. と同様である。さらに、ステージ移動により発生する除振装置上負荷の重心変化の影響による傾斜量を評価するために、ステージの重力加速度もモデル化において考慮した。

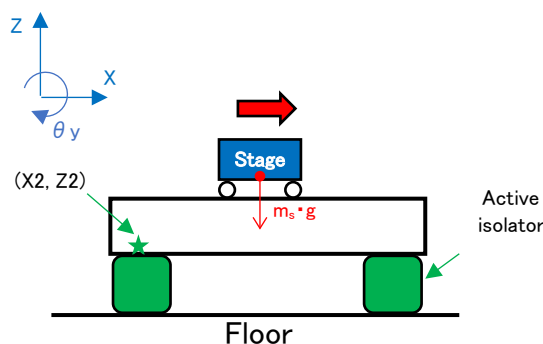


Fig. 23 ステージ移動時のアクティブ除振装置の 2D シミュレーションモデル

Table 3 Simulation parameter of Fig. 23

		Pneumatic active	Piezo active
Active isolator	Eigen frequency	5 [Hz]	15 [Hz]
	Damping ratio	0.05	0.15
	Coordinate of each unit	(x, z): (-0.5, -0.1), (-0.5, -0.1) [m]	
Stage	Weight	100 [kg]	
	Center of gravity	z: (0, +0.2) [m]	
	Moving distance	x: +0.5[m] (-0.25 → +0.25 [m])	
	Other conditions	Max. acceleration: 1.96[m/s ²] Max. velocity: 0.2[m/s], Max. jerk: 50[m/s]	
M2	Weight	2000 [kg]	
	Center of gravity	(x, z): (0.0, 0.0) [m]	
Measurement point (X2, Z2)		(-0.5, 0.0) [m]	

床からアクティブ除振装置バネ上(X2, Z2)までの振動伝達特性を Fig. 24, Fig. 25 に示す。Fig. 24 はエアアクティブ除振装置, Fig. 25 はピエゾ式アクティブ除振装置による結果である。制御パラメータは 4 節と同様に床からアクティブ除振装置バネ上までの伝達特性が同程度になるようにそれぞれ現実的なレベルまで調整してある。

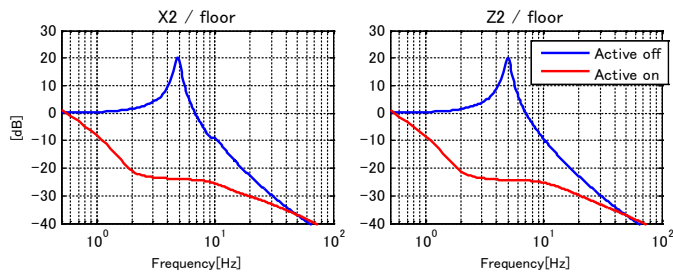


Fig. 24 ステージ移動モデルの除振性能 (空圧式アクティブ除振装置)

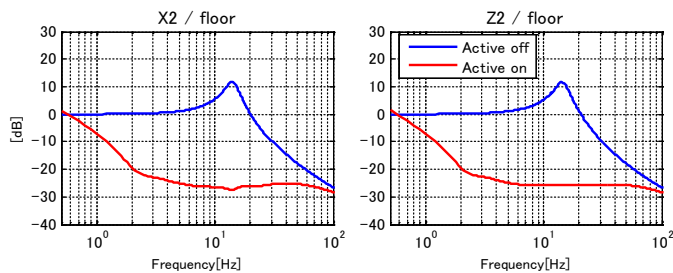


Fig. 25 ステージ移動モデルの除振性能 (ピエゾ式アクティブ除振装置)

シミュレーション結果を Fig. 26, Fig. 27 に示す。Fig. 26 は空圧式アクティブ除振装置, Fig. 27 はピエゾ式アクティブ除振装置による結果である。図中、上側は除振装置上の水平加速度, 下側は鉛直方向変位の時間応答である。上図は制振性能評価用, 下図は重心変化による姿勢維持性能評価用として用いる。Fig. 26 より空圧式除振装置はアクティブ制御によりステージ移動時の振動は速やかに制振されていることが分かる。さらに、変位制御により搭載装置の変位も速やかに元に戻っていることが分かる。なお、特許機器はステージの速度、変位信号を制振制御に用いるステージフィードフォワード

ード制御の技術を有しており、Fig. 26 の結果よりさらに制振性能を向上させることが可能である。

Fig. 27 より、ピエゾ式アクティブ除振装置の制振性能はアクティブ制御の有無にかかわらず一定であり、除振装置の固有周波数の影響を大きく受けていることが分かる。また、ステージ時移動後の変位が元に戻らないことも分かる。これらの理由は 3 節で述べた通り、

- ・除振装置上の直動外乱に対する制振性能は内部エラストマーの物理的性能に大きく依存する。
 - ・除振装置上の偏荷重による搭載装置の傾きを除振装置の制御により元に戻すことができない。
- ためである。

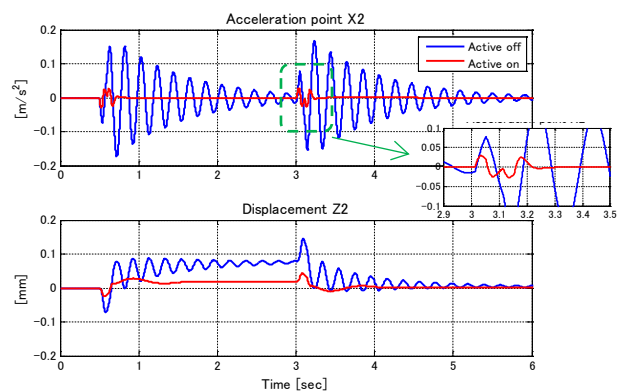


Fig. 26 ステージ移動時の加速度(X), 変位(Z)時間応答 (空圧式アクティブ除振装置)

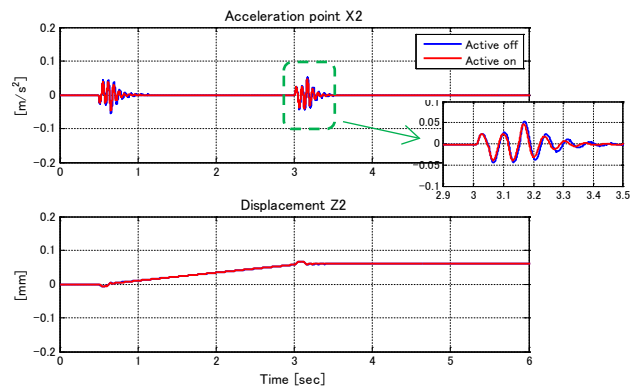


Fig. 27 ステージ移動時の加速度(X), 変位(Z)時間応答 (ピエゾ式アクティブ除振装置)

6. 結論

ピエゾ式アクティブ除振装置は、その構造上の都合により以下の制約が存在する。

- ・低周波域から中周波域(約 2~30Hz)の除振に特化した装置であり、高周波域の弾性モードが励起されやすいため、バネの柔らかい空圧式除振装置の下に設置する必要がある。

- ・装置内部エラストマーのクリープにより装置上側が数十から数百マイクロオーダーで傾く可能性があることを考慮する必要がある。

- ・装置上側の直動外乱に対する制振性能は内部エラストマーの物理的性質に大きく依存する。アクティブ制御により改善することはないため、外乱が固有値近傍の周波数成分を有するとき振動は増幅される。

空圧アクティブ除振装置は柔らかいバネを持つため、制御を行わないとアンバランスである欠点を持つが、特許機器の制御技術はその欠点を十分に克服できる。搭載装置が高重心かつ低固有値のパッシブ除振装置であっても、安定であり、かつ除振性能の劣化がなく広い周波数帯域で高い除振性能を得ることができる。空圧アクティブ除振装置はピエゾ式アクティブ除振装置に比べ適用範囲が広い万能な除振装置であることがいえる。