

piezoアクチュエータを用いた2種類の制御システムについての制御実験 アクチュエータの加振特性に依存する制御の限界

神永 敏行*

Control Experiment for Two Kinds of Regulating Systems Using a Piezoelectric Actuator

Limit of control depending on the exciting characteristic of the actuator

by Toshiyuki KAMINAGA

Abstract

When the practicality of control using a piezoelectric actuator, especially the limit of control by beam vibration control, is considered, it becomes important to assess the amount of control over the regulatory system of the design. Since control performance generally changes with the setup of a weight function, setting up the degree of control with how a weight function is built serves as an important element. Although the control characteristic designed using this time features almost the same weight function, a control experiment is conducted on two kinds of regulatory systems, with different control performances, and the result following examination of the control performance is reported.

要 旨

piezoアクチュエータを用いた制御の実用性、特に梁振動制御による制御の限界について考えた場合、設計する制御システムに対する制御量の大きさを把握することが重要となる。制御性能は、一般に重み関数の設定によって変化するので、重み関数をどう構築するかが制御量を設定する重要な要素となる。今回、ほぼ同様な重み関数を用いて設計した、制御特性はほぼ同じであるが制御性能の異なる2種類の制御システムについて制御実験を行い、その制御性能について検討した結果を報告する。

キーワード： piezoアクチュエータ／重み関数／加振特性／梁振動制御

1. はじめに

制御機構を使用するにあたり、適用する制御器の効率・性能を把握する事は、実際的な制御機構を設計する場合の重要な要素になると考える。しかし、現状では piezo素子をアクチュエータとして制御に用いた場合の実際的な設計に対する適当な資料等を得るのが困難な状況である。 piezo素子を用いた場合の実際的な検討事項として、特に梁振動制御による制御の限界について考えた場合、次の2点を挙げる事が出来ると考える。

①実際の梁の剛性及び振動による応力に対する制御の可能性

②設計された制御システムの保有する制御性能の実際的な確保の可能性

実際に使用されている大梁の大きさは、梁背約90cm程度、スパン約10m前後とされ積載荷重も種々変化すると考えられる。また、制御を行う位置をどの梁に設定するかで、例えば大梁又は小梁にするのか、或いは根太にするかで、設定する剛性及び応力の大きさが変わってくる。これに対し、 piezo素子は発生力の限界がほぼ各定形寸法毎に定められている。そのため制御に必要とする発生力を想定することは可能である。しかし、 piezo取り付け法等による発生力の有効率を考慮する必要があり、設計では

* 技術研究所振動基礎研究室

ではピエゾ素子をアクチュエータとした加振実験を行い、加振電圧と応答との伝達関数を求めることによって算定される。実験による発生力の有効率は、1/100或いは1/1000のオーダーとなっている。一連の制御実験で使用した有効率は、約0.06~0.003程度であった。これらの値は、取り付け治具等の詳細かつピエゾ素子の取り付け法によって変化すると考えられる。また、部材寸法や部材応力によって変化する事も考えられ、特定の値に限定することは困難と考えられる。

次に制御システムを設計する場合、制御性能をどの程度保有させるか或いは可能かは重要な事である。制御の性能は、一般に重み関数の設定によって変化するので、重み関数をどのように構築するかが制御の限界を設定する主要な要素となる。しかし、重み関数の設定が旨いき、設計された制御システムの制御性能が向上しても、実際の制御に用いる場合、あるレベル以上の制御力になると制御システムが自己の発振により発散することも生じる。

今回の検討では、ほぼ同様な重み関数を用いて設計した、制御特性はほぼ同じであるが制御性能の異なる2種類の制御システムについて制御実験を行った結果を報告する。

2. 制御システムの特性

ここでは、設計制御システムについての特性について述べる。制御システムは、2種類の重み関数を用いて設計した。

まず、図1に実験装置の全体図を示す。今回の実験は、入力振動を観測する加速度計が以前の制御で用いたフレーム床上と異なり、フレーム柱脚の脇に設置している。また、入力振動は、土間コンクリート床より伝わる常時振動のみとしている。これは、低加速度の外乱入力により発生する振動に対する制御システムの設計を目的とした為である。

次に、制御システムの設計に用いた伝達関数を示す。まず、柱脚からの入力加速度に対する梁中央の応答加速度とした場合の伝達関数を図2に示す。

また、ピエゾ素子の加振により発生した梁の振動について、ピエゾ素子への加振電圧に対する梁中央の発生加速度とした場合の伝達関数を図3に示す。

次に、制御システム設計に用いた重み関数を図4に示す。ここで、細線の重み関数をA（制御力係数1.0で発散しない）とし、太線をB（制御力係数1.0で発散した）とする。

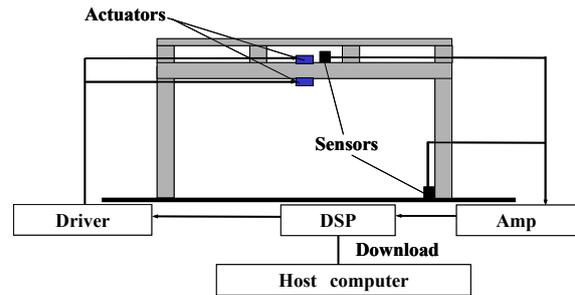


図1 実験装置全体図

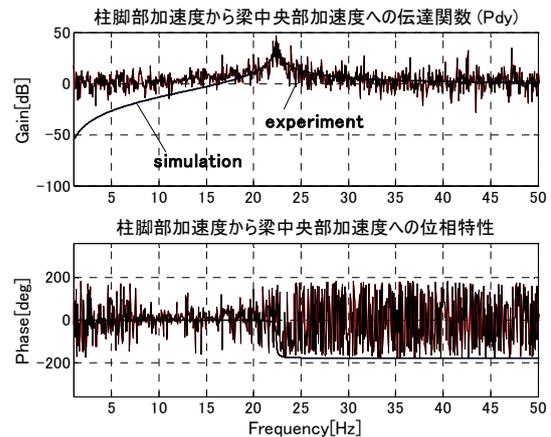


図2 柱脚からの入力加速度に対する梁中央の応答加速度迄の伝達関数

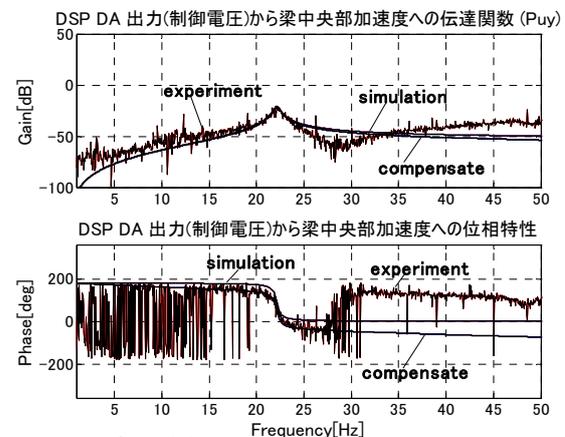


図3 ピエゾ素子への加振電圧から梁中央の発生加速度迄の伝達関数

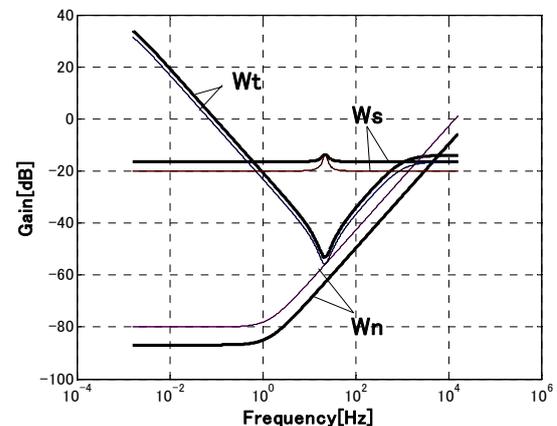


図4 重み関数 A (細線) 及び B (太線)

次に、重み関数A及び重み関数Bを用いてそれぞれ制御システムを設計した場合のプラントモデルにおける非制御時伝達関数と制御時伝達関数を図5, 6に示す。ここで図5がゲイン量を、図6が位相差を示す。図5より細線がプラントの非制御時伝達関数、太線が重み関数Aを用いた場合のプラントの制御時伝達関数、および重み関数Bを用いた場合のプラントの制御時伝達関数である。

制御時伝達関数の全体の形状を見てみると、重み関数Aによる場合、非制御時に対し約20~25Hzで応答が低減しているが、約25~60Hzで応答が逆に増加し徐々に減少する関数となっている。また、重み関数Bによる場合、約17~30Hzで応答が低減しているが、約30~160Hzで同じように応答が増加し徐々に減少する関数となっている。

重み関数Aによる制御量は、約30dB程度となっている。重み関数Bによる制御量は約35dB程度となり、重み関数AとBの制御量の差は重み関数Bが約5dB大きな制御量を示している。図6は位相差を示すが、重み関数A及びBの両方において約-97, 98度前後でプラントの位相曲線と交わっており、重み関数の違いによる差はほとんど生じていない。ただし、プラントの固有周波数22.3Hzの前後約20Hz以内では重み関数Bの方が非制御時に対し大きな位相差を示している。以上が設計した制御システムの特徴であるが、制御器設計時の γ は、重み関数Aで1.074、重み関数Bで0.905である。

3. 制御実験及び解析結果

次に、実験及び結果について述べる。実験は上記で述べた重み関数A及びBを用いて設計した制御システムによるフィードバック制御を行う。ここで、重み関数Aを用いたプラントを制御システムAと、重み関数Bを用いたプラントを制御システムBとする。従って、図5から解るように制御システムBは制御システムAより制御性能が高いシステムと言える。

まず初めに、各制御システムについて設計されたままの制御力を出力し制御実験を行い、制御状態を観察する。その後制御結果を基に制御力を増減し、同じように制御実験を行う。

図7, 8に設計されたままでの制御力を出力した場合の梁中央における応答加速度時刻歴及びそのフーリエ解析結果(2秒から6秒までのデータを使用)を、図9に非制御時の結果を示す。図7より、制御システ

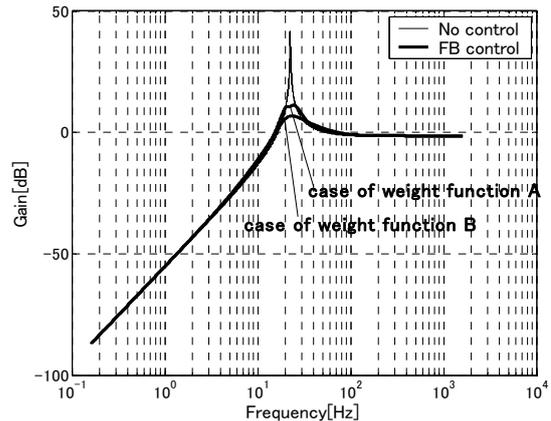


図5 プラントの非制御時及び制御時伝達関数 (ゲイン量)

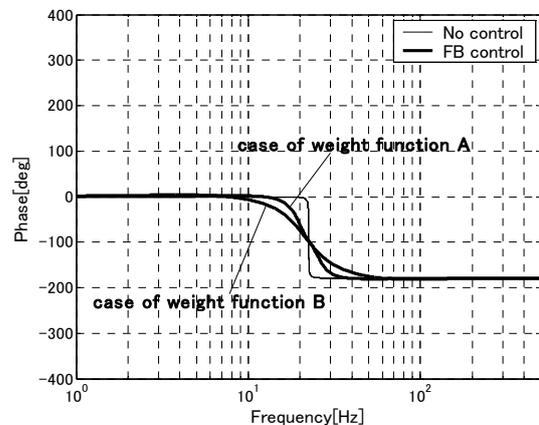
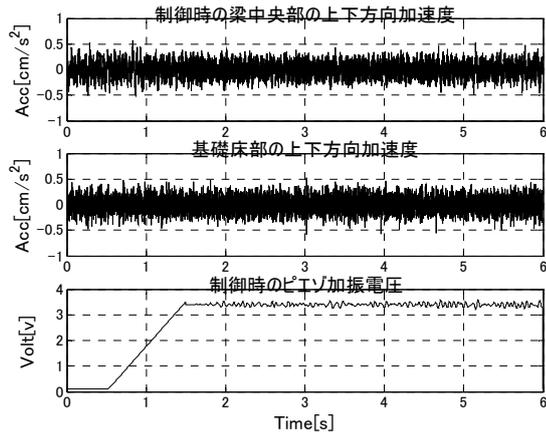


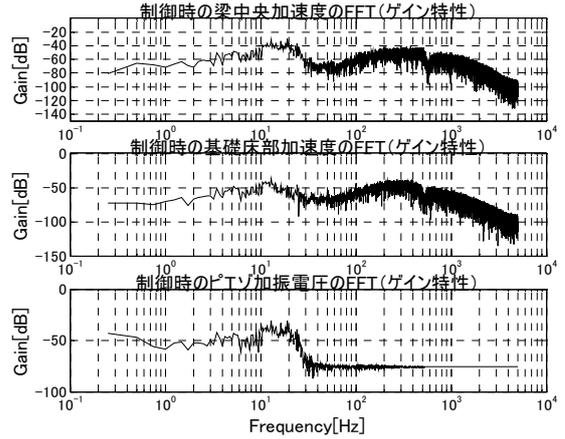
図6 プラントの非制御時及び制御時伝達関数 (位相差)

ムAは梁中央の応答加速度及び柱脚の加速度共に同程度の値を示し、また出力加振電圧も安定し発散せず制御を行っていることがわかる。それに対し図8より、制御システムBは制御開始時より梁中央の応答が発散し、応答加速度の測定許容値(2gal)をオーバーしている。同時に柱脚の加速度もその影響で2倍程増幅している。また、出力加振電圧も制御システムAに比べ大きな値となり、かつ不安定な出力となっている。次にFFT解析結果を見てみる。まず図9の非制御時の梁中央応答加速度の解析結果は、一次の固有振動数である約23Hzで最大を示している。次に制御システムAでは、図7より約23Hz近傍で低下し制御効果が現われている。これに対し制御システムBでは、図8より約150Hzあたりで最大となり、これが制御の発散する原因と考えられる。

上記のように制御が発散する原因の一つとして、制御が強すぎるために生じることが考えられる。そのため、制御力に係数を乗じて制御力を変化させた場合に制御応答結果がどのように変化するかを検討

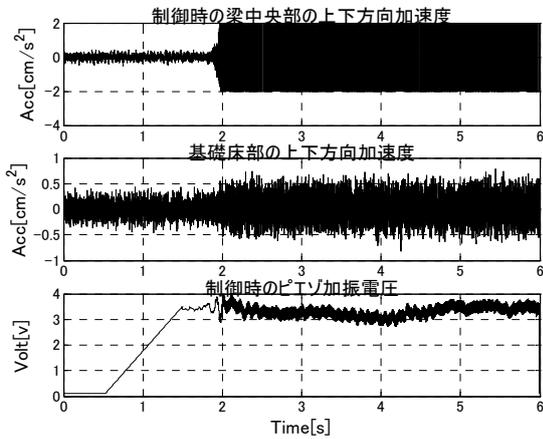


応答加速度及び加振電圧の時刻歴

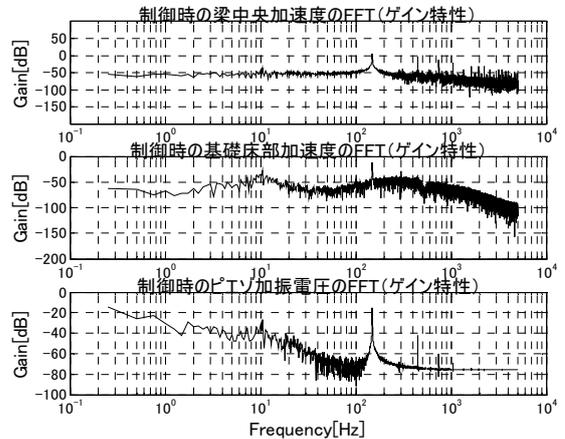


応答加速度及び加振電圧の FFT 解析結果

図 7 制御システム A のフィードバック制御の結果

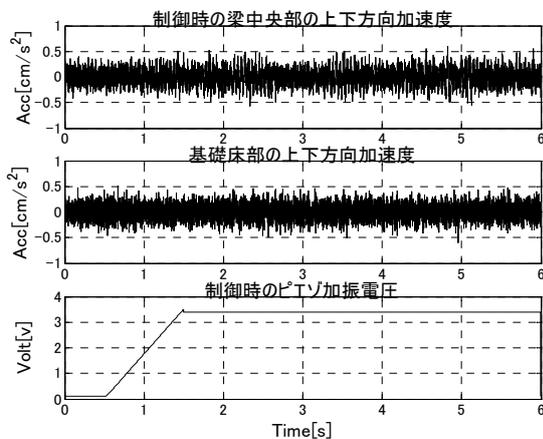


応答加速度及び加振電圧の時刻歴

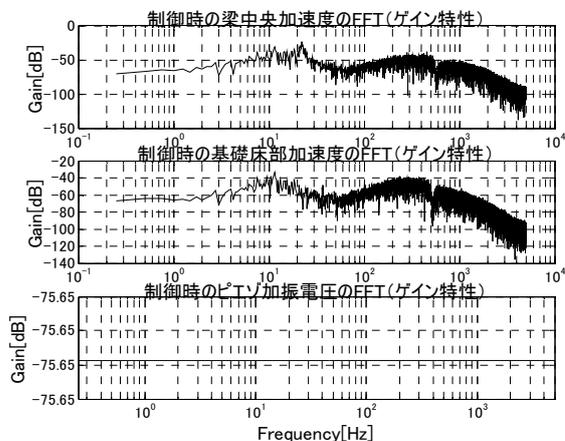


応答加速度及び加振電圧の FFT 解析結果

図 8 制御システム B のフィードバック制御結果



応答加速度及び加振電圧の時刻歴



応答加速度及び加振電圧の FFT 解析結果

図 9 非制御時の結果

した。表1に各制御システムに乗じた係数（制御力係数）を示す。表1のように制御システムAでは制御力が増加する側へ、制御システムBでは減少する側へ設定している。これらの制御力を用いたフィードバック制御の結果を図10～15に示す。

その結果、制御システムAでは、図10～12の制御結果を見ると、制御力係数を2.0程度まで増加させてもほとんど応答に変化が無く、2.5で多少応答が増加する程度で発散は生じていない。3.0以上では応答の大きな増加が生じ発散に至っている。梁加速度のFFT解析結果を見ると、制御力係数が0の時、すなわち非制御時の場合、図9の非制御時FFT解析結果と同じく約23Hzでゲインが最大を示し、徐々に制御力係数を大きくしていくとゲインが制御効果により減少していき、制御力係数が2.0までこの傾向が続き、この程度の増加を許容することも可能である。そして、それ以上の増加では固有振動数より

小さい約15Hzあたりのスペクトル値が、制御力係数の増加と共に大きくなっていき、3.0以上では100Hz近傍の値も徐々に増加し、その後最大となる。ピエゾ加振電圧のFFT解析結果も同様な傾向を示している。

制御システムBでは、図13～15の制御結果を見ると、制御力係数を0.4程度まで減少させると安定した応答性状を示すが、0.45以上で応答は発散している。梁加速度のFFT解析結果を見ると、制御力係数が0の時、図9の非制御時FFT解析結果と同じく約23Hzでゲインが最大を示し、制御力係数を0.3程度まで増加させてもゲインは制御効果により減少するが、それを上回る制御力係数の増加では150Hz近傍でスペクトル値は増加し最大を示している。ピエゾ加振電圧のFFT解析結果も同様な傾向を示している。また、制御力係数が0.4迄は、制御システムAと同様な解析結果形状を示している。

表1 制御システムの制御力に乗じた係数(制御力係数)

	係 数							
制御システムA	0.50	1.00	1.25	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00
制御システムB	0.10	0.20	0.30	0.40	0.45	0.50	0.75	1.00

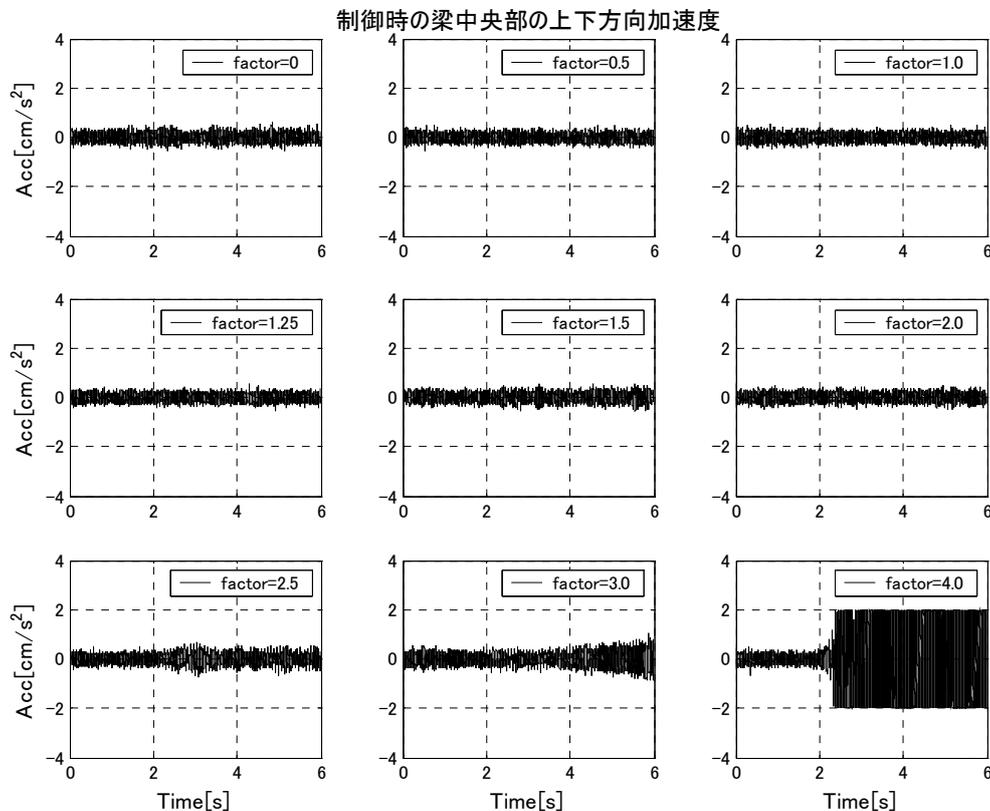
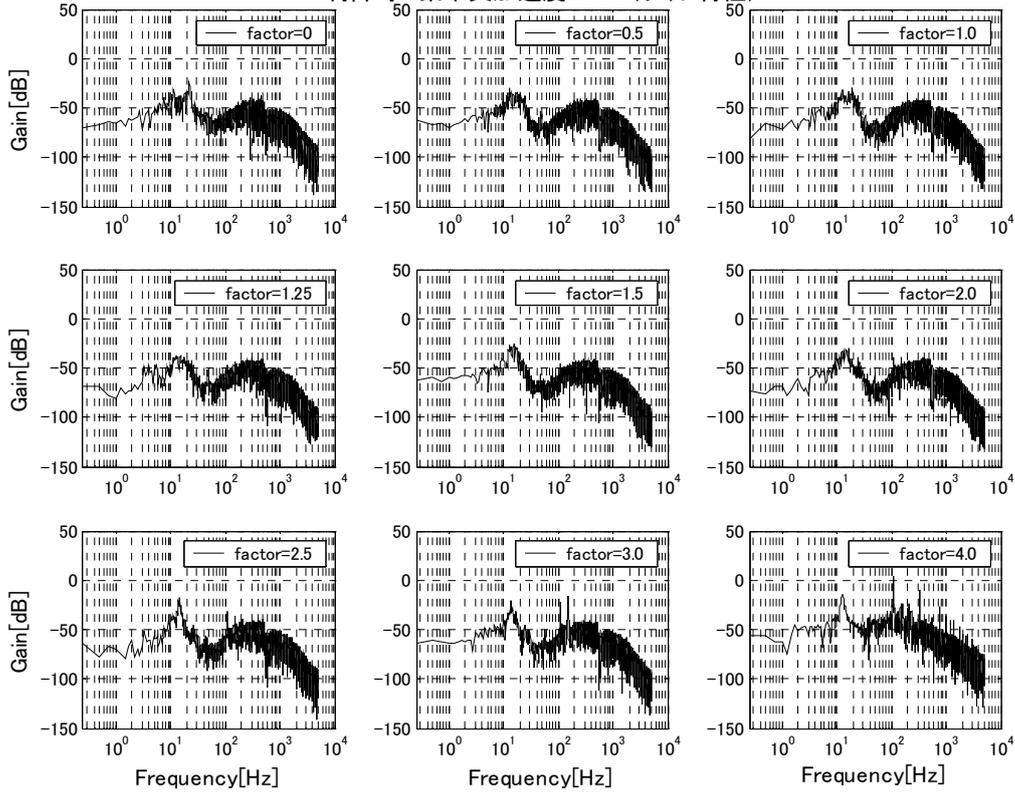


図10 制御システムAのフィードバック制御結果(1)

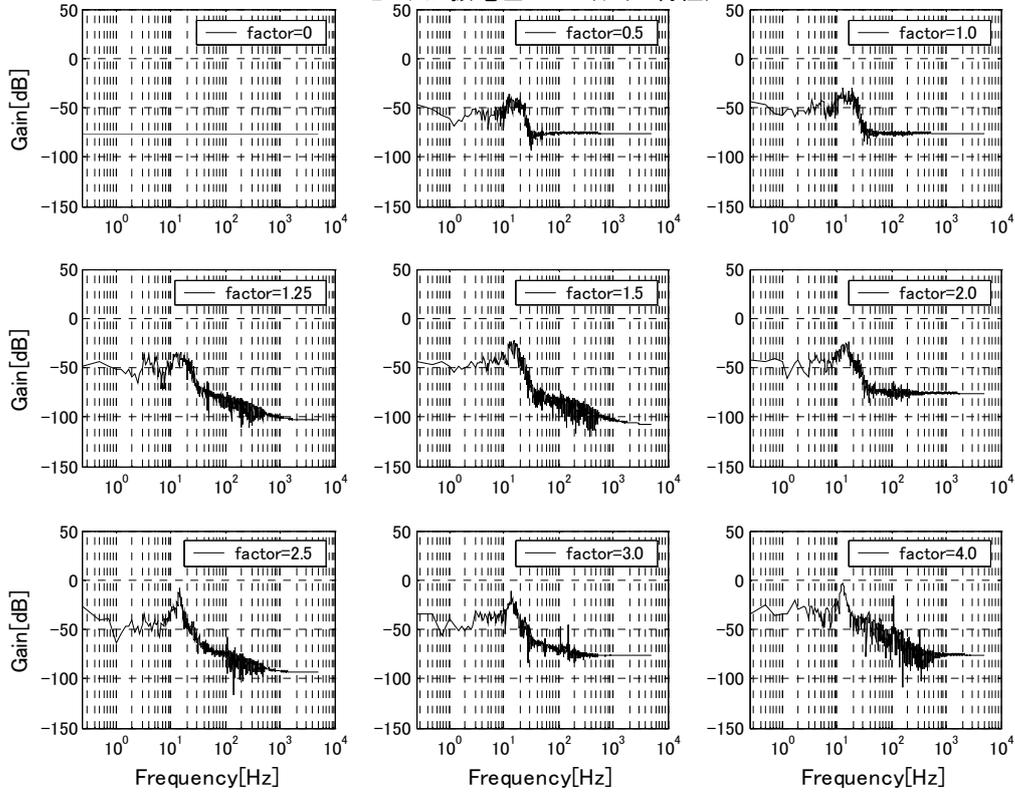
制御時の梁中央加速度のFFT(ゲイン特性)



梁応答加速度のFFT 解析結果

図 11 制御システム A のフィードバック制御結果 (2)

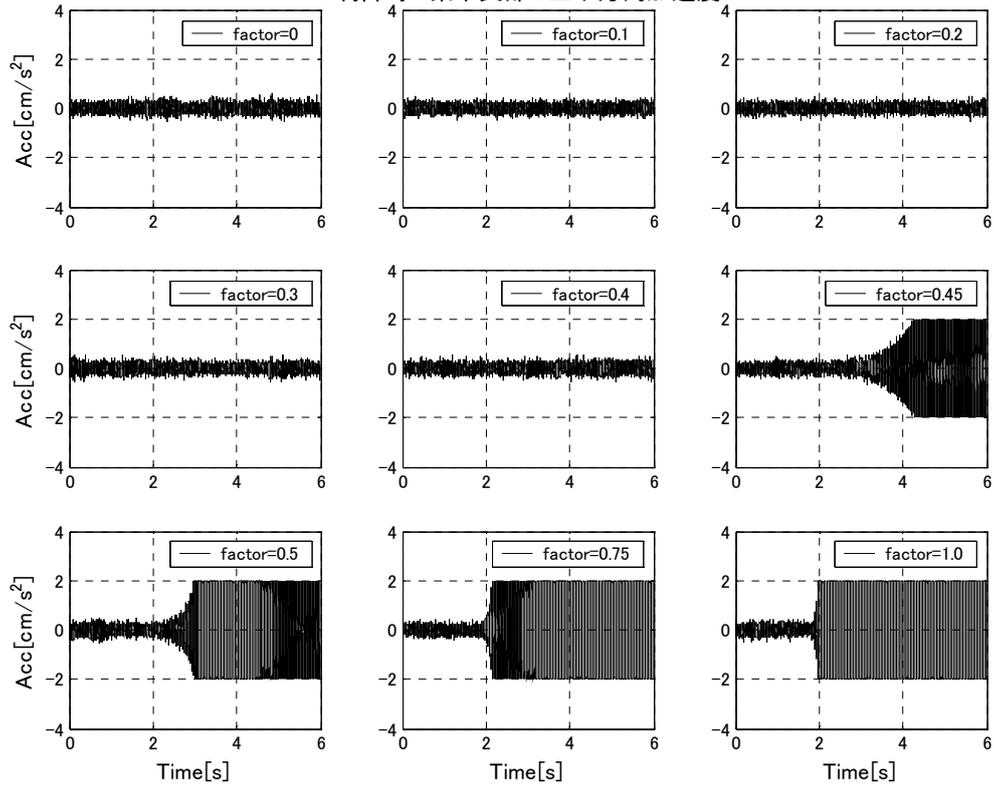
ピエゾ加振電圧のFFT(ゲイン特性)



ピエゾ加振電圧のFFT 解析結果

図 12 制御システム A のフィードバック制御結果 (3)

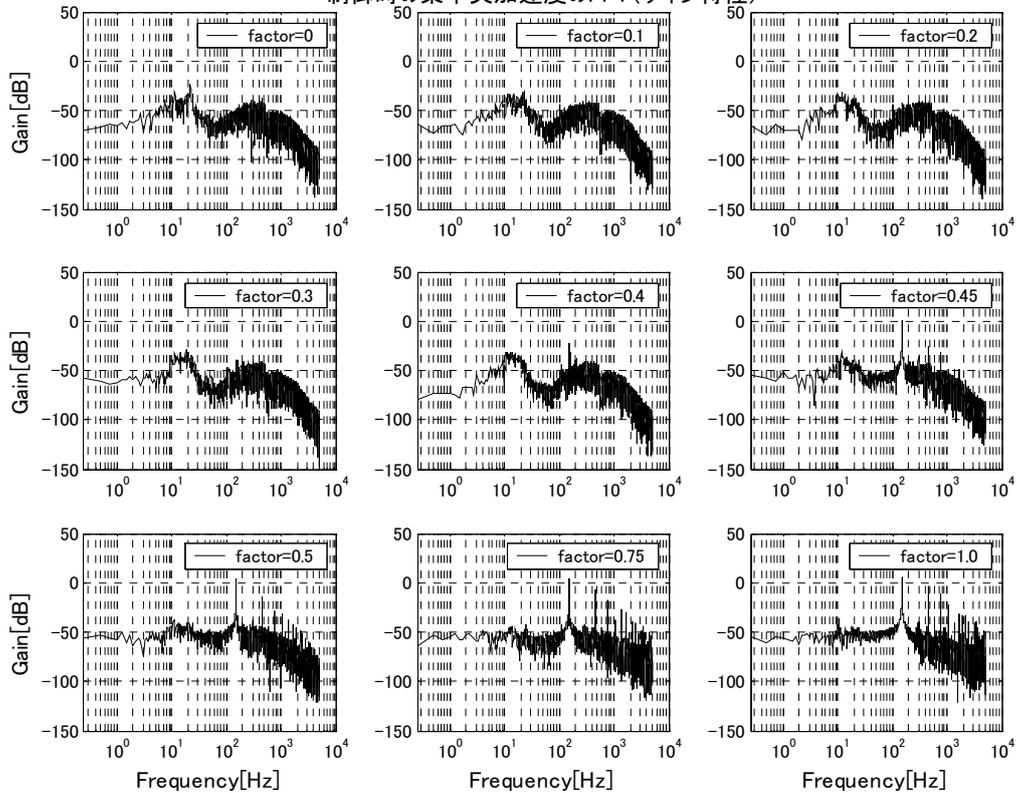
制御時の梁中央部の上下方向加速度



梁応答加速度時刻歴

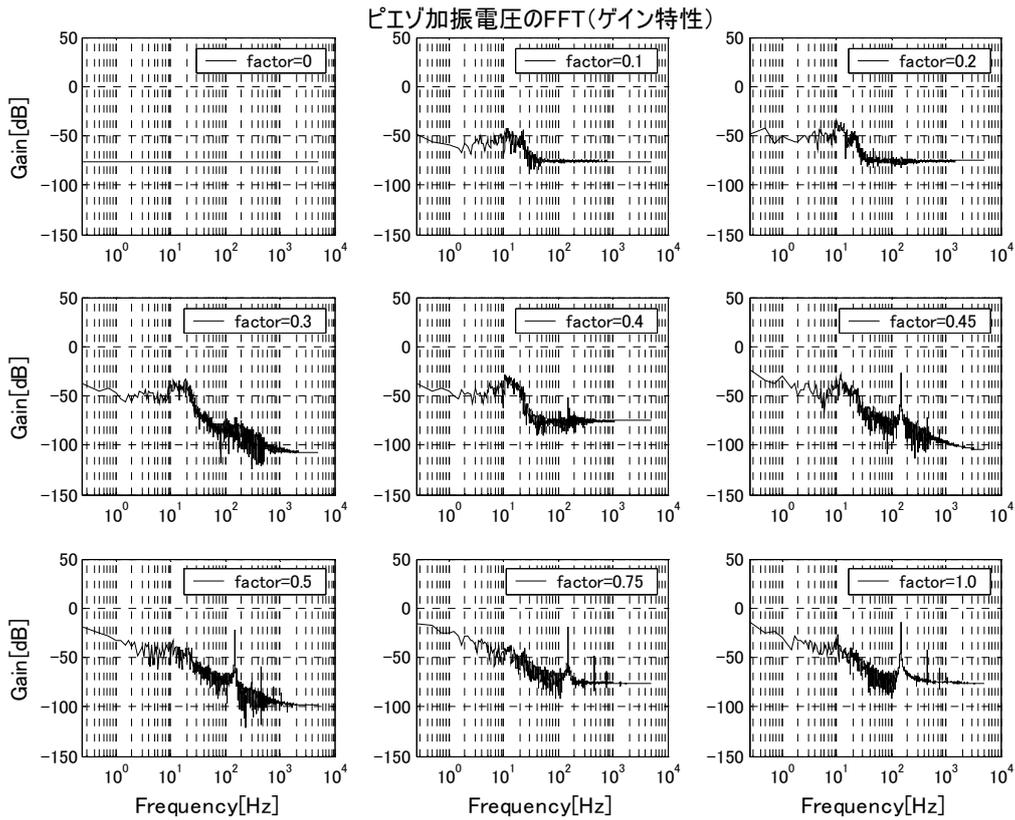
図 13 制御システム B のフィードバック制御結果 (1)

制御時の梁中央加速度のFFT(ゲイン特性)



梁応答加速度のFFT 解析結果

図 14 制御システム B のフィードバック制御結果 (2)



ピエゾ加振電圧のFFT 解析結果

図 15 制御システム B のフィードバック制御結果 (3)

次に、設計上制御効果を大きく採れる制御システム B が、150Hz 近傍でゲインが最大となる原因を検討するため、プラント、制御器およびフィードバックシステムの各固有値解析を行い、そのときの固有

振動数を求めた。表 2 にプラントの、表 3 に制御器の、表 4 にフィードバックシステムの固有値および固有振動数を示す。

表 2 プラントの固有値

制御システム B			制御システム A		
Plant eigen value	振動数		Plant eigen value	振動数	
($\times 1.0e+002$)	(rad/s)	(Hz)	($\times 1.0e+002$)	(rad/s)	(Hz)
-0.0049 + 1.4074 i	140.74	22.41	-0.0049 + 1.4074 i	140.74	22.41
-0.0049 - 1.4074 i	140.74	22.41	-0.0049 - 1.4074 i	140.74	22.41
-4.0841	408.41	65.03	-4.0841	408.41	65.03
-4.0841	408.41	65.03	-4.0841	408.41	65.03

表 3 制御器の固有値

制御システム B			制御システム A		
Controller eigen value	振動数		Controller eigen value	振動数	
($\times 1.0e+006$)	(rad/s)	(Hz)	($\times 1.0e+006$)	(rad/s)	(Hz)
-1.3378	1337800	213025.48	-2.4654	2465400	392579.62
-0.0063	6300	1003.18	-0.0063	6300	1003.18
-0.0004 + 0 i	400	63.69	-0.0004 + 0 i	400	63.69
-0.0004 - 0 i	400	63.69	-0.0004 - 0 i	400	63.69
0 + 0.0001 i	100	15.92	0.0001	100	15.92
0 - 0.0001 i	100	15.92	0 + 0.0001 i	100	15.92
0.0001	100	15.92	0 - 0.0001 i	100	15.92
0	0	0	0	0	0

表 4 制御システムの固有値

制御システムB				制御システムA		
FB system eigen value	振動数		FB system eigen value	振動数		
($\times 1.0e+005$)	(rad/s)	(Hz)	($\times 1.0e+004$)	(rad/s)	(Hz)	
-1.6333	163330	26007.96	-7.4531	74531	11867.99	
-0.0068	680	108.28	-0.0465	465.00	74.04	
-0.0037 + 0.0028 i	464.00	73.89	-0.0408	408.00	64.97	
-0.0037 - 0.0028 i	464.00	73.89	-0.0408	408.00	64.97	
-0.0041 + 0 i	410.00	65.29	-0.0327	327.00	52.07	
-0.0041 - 0 i	410.00	65.29	-0.0017 + 0.0139 i	140.04	22.30	
-0.0003 + 0.0014 i	143.18	22.80	-0.0017 - 0.0139 i	140.04	22.30	
-0.0003 - 0.0014 i	143.18	22.80	-0.007 + 0.0126 i	144.14	22.95	
-0.0005	50.00	7.96	-0.007 - 0.0126 i	144.14	22.95	
0 + 0 i	0	0	-0.0001 + 0.0001 i	1.41	0.23	
0 - 0 i	0	0	-0.0001 - 0.0001 i	1.41	0.23	
0 + 0 i	0	0	0	0	0	
0 - 0 i	0	0	0	0	0	

上記各表より、制御システムAが100Hz近傍で共振する要素を含んでいないこと、また制御システムBが150Hz近傍で共振する要素を含んでいないことより、制御システム自体の特性により発散振動が発生していないことが分かる。

次にピエゾ素子によるランダム波加振時における梁中央の応答加速度、柱脚の応答加速度およびピエゾに加えた加振電圧の各FFT解析結果を図16に示す。その結果、梁中央応答波のFFT解析より約23Hzで大きく卓越し、梁の固有振動数を示している。また、約100Hzおよび約150Hzでゲインが卓越していることが分かる。制御は、約23Hzの周波数成分による応答を低減するために行っているが、制御効果によりこの周波数成分による応答が低減されるのと同時に、次の主成分である約100Hzあるいは約150Hzの近傍における制御を考慮しない成分応答が卓越するため、制御応答が発散したと考えられる。正常な制御が行われている場合、図7の制御電圧のFFT解析結果のように制御する振動数成分の近傍より大きな振動成分が小さくなり、発散現象が生じにくい状況になっている。

4. まとめ

ほぼ同様な重み関数を用いて設計した、制御特性はほぼ同じであるが制御性能の異なる2種類の制御システムについて制御実験を行った結果、制御性能が良い制御システムにおいて制御応答が発散する現象が生じた。その原因は、アクチュエータの加振特性に依存する関係から生じたものと考えられる。そのため、制御システムを設計する場合、制御量の大きさばかりでなく、アクチュエータの加振特性によ

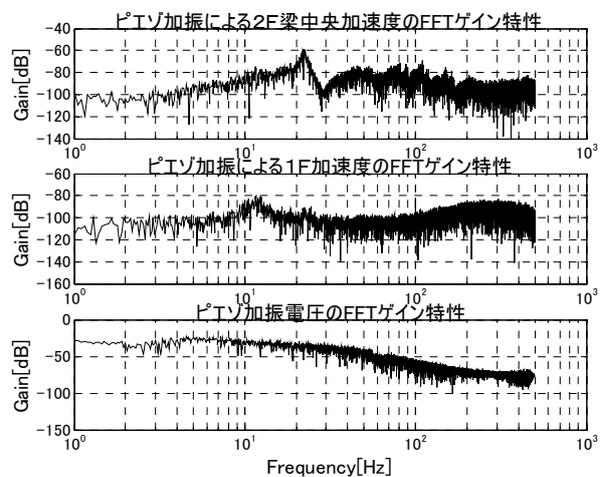


図 16 ピエゾ素子によるランダム波加振時
応答波のFFT解析結果

る制御力を考慮した制御システムの設計を行うことが必要である。

参考文献

- [1] 安藤雅倫他:ピエゾアクチュエータによる鉄骨造建物の上下振動制御,日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I,2002
- [2] 神永敏行他:ピエゾアクチュエータによる鉄骨造建物の上下振動制御その 2,日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I,2003
- [3] 神永敏行他:ピエゾアクチュエータによる鉄骨造建物の上下振動制御その 3,日本建築学会学術講演梗概集,環境工学 I,2004
- [4] 野波健蔵,西村秀和,平田光男:MATLABによる制御器設計,東京電機大学出版

