

# 鉄骨造建物の鉛直微振動制御に関する研究

## その3 フィードバック制御とフィードフォワード制御を併用したアクティブ制御

神永 敏幸\* 八ッ繁 公一\*\* 藤本 利昭\* 鎌田 崇義\*\*\*

### Study on Vertical Microvibration Control of Steel Structure

Part 3 Active control using both feedback and feed-forward control

by Toshiyuki KAMINAGA, Koichi YATSUSHIGE, Toshiaki FUJIMOTO and Takayoshi KAMADA

#### Abstract

The active control technology, a technique for beam bending using PIEZO actuators as the control technology that support chip fabrication facilities which require strict low-oscillation environments, and moment control using a front report was proposed. The control system model which uses feed-forward control along with the existing feedback control for improving control performance could be designed, the same control experiment as the front report could be conducted, and a high control effect for the control system model using feed-forward control together could be checked with this method

#### 要 旨

前報では、厳しい低振動環境を必要とする半導体工場等に対応出来る制振技術として、ピエゾアクチュエータを用い梁の曲げモーメントを制御する手法であるアクティブ制御技術を提案した。本法では、制振性能のさらなる向上を目的として、既存のフィードバック制御にフィードフォワード制御を併用する制御系モデルを設計し、前報と同じ制御実験を行い、フィードフォワード制御を併用した制御系モデルの高い制振効果を確認する事ができた。

キーワード：アクティブ制御／フィードバック制御／フィードフォワード制御／ $H_{\infty}$ 制御

#### 1. はじめに

半導体工場等における生産技術は、年々より微細・精密化へと進化しており、半導体工場等では可能な限り誤作業の原因となる振動外乱の少ない低振動環境が要求されている。

前報[11]では、梁部分にピエゾアクチュエータを組み込み梁の曲げモーメントを制御することで、実験モデルの上下振動を押さえる方法を提案した。また、 $H_{\infty}$ 制御理論より設計したフィードバック（以下 FB）制御器について、クリーンルーム（以下 CR）を模した鉄骨フレームを用い微振動制御実験を行い、その性能を確認した。その結果、正弦波及

びランダム波を外乱とした場合、大きな制御効果を確認することが出来た。また、外乱としてインパルス波を用いた場合、短時間で振動を制振する高減衰性を付加することも出来た。しかし、その時の初期応答の大きさは、非制御時と同程度の振動となり、FB 制御による効果がほとんど得られなかった。制御システムの使用効果等を考慮した場合、インパルス波入力時の初期応答に対する制振性も重要となる。そのため、インパルス波初期応答を低減する制御システムとして、FB 制御器にフィードフォワード（以下 FF）制御器を追加し、FB 制御と FF 制御を併用したアクティブ制御の検討を行った。

\* 技術研究所振動基礎グループ \*\* 技術研究所所長

\*\*\*東京農工大学工学部機械システム工学科 助教授

## 2. 実験モデル

実験モデルは、前報と同じ、クリーンルームの一部を模擬した縦 3.00m、横 1.80m、高さ 1.75m の鉄骨フレーム構造で、床として根太上にグレーチングを敷設している。実験モデルの概略図を図 2.1 に示す。外乱は、床上に設置した電磁起振器により上下動を入力する。また起振器駆動部に加速度センサを、梁の中央部に加速度センサ、 piezoアクチュエータを取りつける。piezoアクチュエータは梁上端・下端の対称位置にあり、逆位相の指令電圧を与えることによってモーメント制御を行う (piezoアクチュエータはボルトで予圧を加えて設置し、基準電圧を印加しておく)。次に実験装置全体の構成および信号の流れを図 2.2 に示す。起振器駆動部及び実験モデルの梁に設置した加速度センサから得られた絶対加速度をアンプ、DSP へと入力し、予め PC からダウンロードした制御器によって制御電圧が計算・出力される。その信号が piezoドライバで増幅され、piezoアクチュエータへ入力される。

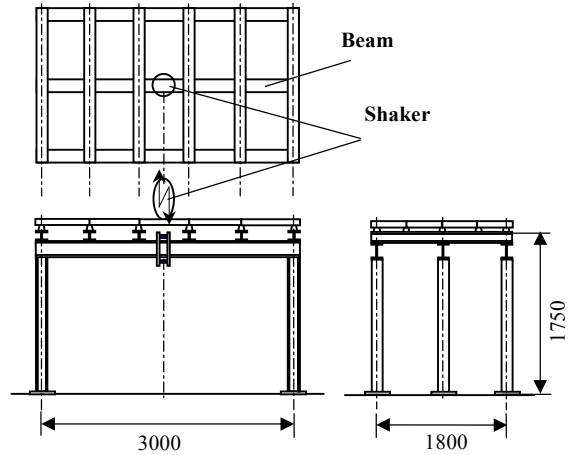


図 2.1 実験モデル

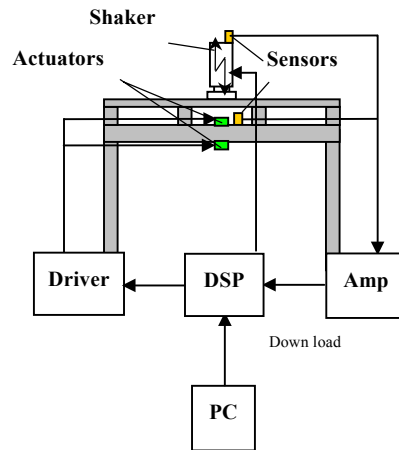


図 2.2 制御システム

## 3. FF 制御器の設計

### (1) FF 制御系の概要

FB 制御に FF 制御を併用した場合の制御系の概略図を図 3.1 に示す。これより、梁の中央部の加速度  $y$  は、

$$y = P_{dy}d + P_{uy}u \quad \dots (1)$$

$$u = u_B + u_F = C_B y + C_F d \quad \dots (2)$$

と導ける。ここで、FF 制御器 ( $K_F$ , その伝達関数は  $C_F$ ) の目的は外乱  $d$  からの影響を 0 にする事にあるので、 $y=0$  となるよう FF 制御系を選択すると、FB 制御器 ( $K_B$ , その伝達関数は  $C_B$ ) の出力を 0 とする事ができる。またその時、FF 制御系は FB 制御系と無関係となり、独立した制御系として設計できる。

### (2) FF 制御器の設計

(1)で述べたように FF 制御器は、FF 制御のみによる制御力  $u_F$  によって応答加速度  $y$  を 0 にすることにあるので、これより FF 制御器の  $d-u_B$  間の伝達関数  $C_F$  は以下のように求められる。

まず、(1) 式に (2) 式を代入し、 $y=0$  を代入すると、

$$0 = (P_{dy} + P_{uy}C_F) \cdot d$$

$$\therefore C_F = -P_{uy}^{-1}P_{dy} \quad \dots (3)$$

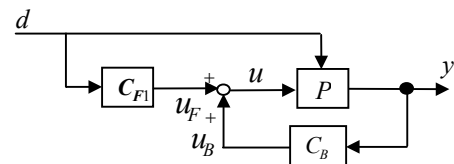


図 3.1 FB 制御に FF 制御を併用したブロック線図となる。

次に伝達関数  $P_{dy}$ ,  $P_{uy}$  の各式を示すと、

$$P_{dy} = \frac{-K_d s^2}{s^2 + 2\zeta_d \omega_d s + \omega_d^2} \quad \dots (4)$$

$$P_{uy} = P_{uy}' \times P_g$$

$$= \frac{K_u s^2}{s^2 + 2\zeta_u \omega_u s + \omega_u^2} \times \frac{\omega_g^2}{s^2 + 2\omega_g s + \omega_g^2} \quad \dots (5)$$

となる。ここで、 $P_{uy}'$  は補正前の伝達関数、 $P_g$  は 2 次遅れ要素、 $\omega_d$ ,  $\zeta_d$  は伝達関数  $P_{dy}$  の同定により算定した固有周波数、減衰定数、 $\omega_u$ ,  $\zeta_u$  は伝達関数  $P_{uy}$  の同定により算定した固有周波数、減衰定数

である。ここで、上記伝達関数に用いた各固有振動数、減衰定数を表 3.1 に示す。

表 3.1 伝達関数のパラメーター一覧

	$P_{dy}$	$P_{uy}'$	$P_g$
$f(\text{Hz})$	25.1	24.3	45.0
$\zeta$	0.010	0.010	1.00
$K$	0.050	0.006	1.0

次に(3)式に(4)式及び(5)式の逆関数を代入し整理すると伝達関数  $C_F$  は、

$$C_F = \frac{s^2 + 2\zeta_u \omega_u s + \omega_u^2}{K_u s^2} \times \frac{s^2 + 2\omega_g s + \omega_g^2}{\omega_g^2} \times \frac{K_d s^2}{s^2 + 2\zeta_d \omega_d s + \omega_d^2} \quad \dots (6)$$

となる。この伝達関数  $C_F$  は、分子の次数が分母の次数より大きくなってしまふ。そのため、適当な関数  $G_F$  を乗じる等の試行錯誤によって FF 制御器の伝達関数  $C_{Fm}$  を作成し、その周波数応答の改善をはかることによって FF 制御器を設計した。

今回、FF 制御器の伝達関数  $C_{Fm}$  は(7)式に示すように以下の方法により作成した。

$$C_{Fm} = C_F' \times G_{F1} \times G_{F2} \quad \dots (7)$$

①関数  $P_{dy}$ ,  $P_{uy}$  において減衰定数  $\zeta_d$ ,  $\zeta_u$ , 固有周波数  $\omega_d$ ,  $\omega_u$  は、表 3.1 に示すようにほぼ等しいので係数  $K_d$ ,  $K_u$  のみを用いる。約分により得られた係数に 2 次遅れ要素  $P_g$  の逆関数を乗じた関数を  $C_F'$  とする。

$$C_F' = \frac{K_d}{K_u} \times \frac{s^2 + 2\omega_g s + \omega_g^2}{\omega_g^2} \quad \dots (8)$$

②任意の補正関数  $G_{F1}$ ,  $G_{F2}$  を設定する。今回の制御実験では、以下に示す形状の補正関数とした。

$$G_{F1} = k \cdot \frac{1}{s^2 + 2\zeta_a \omega_a s + \omega_a^2} \quad \dots (9)$$

$$G_{F2} = \frac{s}{s + \omega_b} \quad \dots (10)$$

ここで、 $\omega_a$ ,  $\omega_b$ ,  $\zeta_a$ ,  $k$  は任意に設定する。

③上記(8)~(10)の各式を(7)式に代入し、FF 制御器の伝達関数  $C_{Fm}$  を算定する。

$$C_{Fm} = k \frac{K_d}{K_u} \times \frac{s^2 + 2\omega_g s + \omega_g^2}{\omega_g^2} \times \frac{1}{s^2 + 2\zeta_a \omega_a s + \omega_a^2} \times \frac{s}{s + \omega_b} \quad \dots (11)$$

#### 4. 制御実験

制御実験は、FB 制御で用いた方法と同様に、クリーンルームを模した鉄骨造フレームを用いた。加振は、フレーム長辺梁上に根太を掛けグレーチングを敷いた床中央部に設置した電磁起振器により行った。制御は、フレーム短辺方向の中央に渡した梁に生じる振動をピエゾアクチュエータを用いて制御する FB 制御実験、FB+FF 制御実験及び非制御実験について行った。実験に用いた外乱は、ランダム波 (5~50Hz でパワースペクトル一定)、正弦波 (固有振動数 25.1Hz) 及びインパルス波の 3 波とした。実験は 20 秒間行い、制御は実験開始から 1.5 秒後に開始し、外乱の加振は 2 秒後から行った。また、ピエゾアクチュエータに負荷する電圧は、実験開始後 0.5 秒までは 0 ボルト、0.5 秒から 1.0 秒間 (実験開始から 1.5 秒後) で 0 ボルトから 3 ボルトまで徐々に電圧負荷を上げていき、ピエゾアクチュエータの安定を図った。

#### 5. 制御器等の特性

実験に用いた FB 制御器は、前報で報告した制御器に今回の同定実験で得られた固有振動数等の特性値を用いたものである。FF 制御器は 3 章(2)で設計した制御器を用いた。

以下に実験で用いた伝達関数  $P_{dy}$  を図 5.1 に  $P_{uy}'$ ,  $P_{uy}$  を図 5.2 に、重み関数を図 5.3 に、コントローラの周波数応答を図 5.4 に、制御システムの周波数応答でゲイン特性を図 5.5 に示す。

##### (1) 制御器の特性

図 5.1, 図 5.2 より、設計した伝達関数  $P_{dy}$ ,  $P_{uy}$  は共に実験結果をかなり正確に包絡したものとなっている。同定実験で算定された実験フレームの上下方向 1 次の固有周波数は、表 3.1 に示したように 25.1Hz と得られた。次に、これらの特性及び図 5.3 に示された重み関数を用いて設計された制御器の周波数特性が、図 5.4 に示されている。FB 制御器は、20Hz 近傍を中心になだらかな凸となる周波数応答性状を呈している。FF 制御器は、固有振動数において急激に凸となる周波数応答性状を示し、かつそ

れより大きな周波数において一定の大きさを持っている。そのため固有振動数近傍の狭い範囲で強い制御特性を示す制御器と言える。

(2) 制御システムの特性

これらを元に設計された制御システム全体の制御特性が、図 5.5 に示されている。この図より、FB制御は、非制御に対して固有振動数で最大約 25dB 程度の低減効果を示している。また、固有周波数を中心になだらかな制御特性を示している。FB+FF制御は固有周波数近傍で急激な応答低減を示す下に凸な周波数応答を示している。非制御に対して固有振動数で最大約 50dB 程度の低減効果を示している。

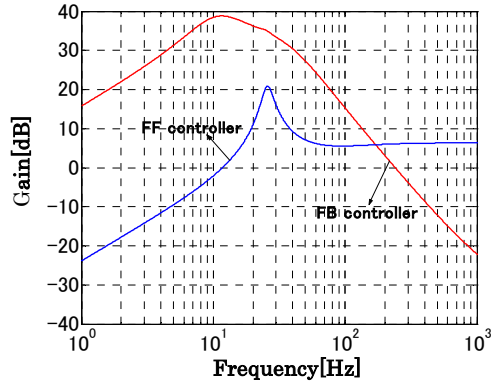


図 5.4 制御器の周波数応答

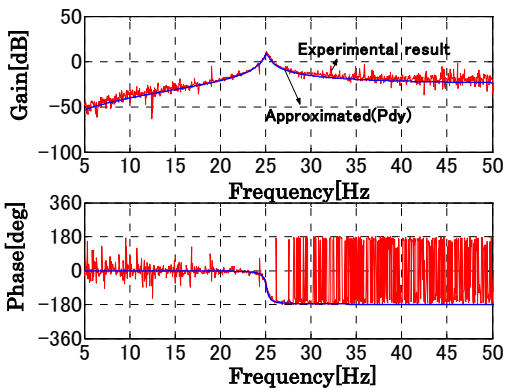


図 5.1 伝達関数 P<sub>dy</sub> の周波数応答

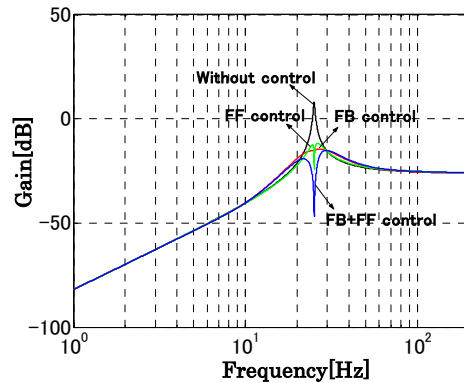


図 5.5 制御及び非制御の場合の伝達関数 P<sub>dy</sub>

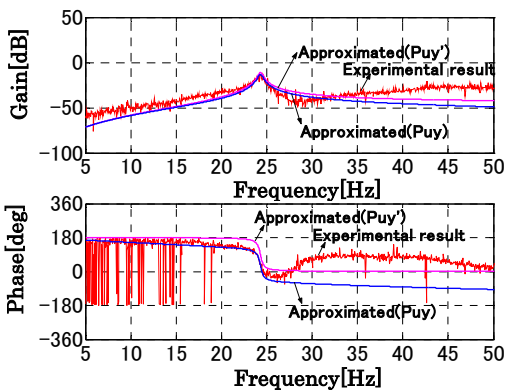


図 5.2 伝達関数 P<sub>uy'</sub>, P<sub>uy</sub> の周波数応答

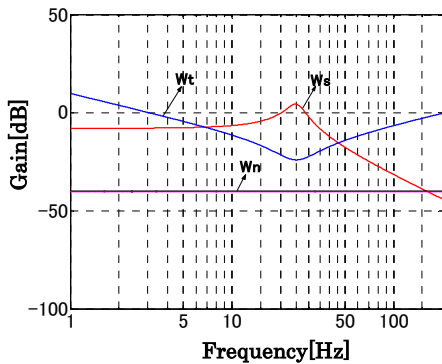


図 5.3 重み関数

(3) 制御とピエゾアクチュエータの関係

ピエゾアクチュエータを用いて制御を行う場合、制御される応答値が大きすぎると電圧増幅器の安全装置が作動し、制御システムが停止する現象が生じる。そのため、制御器設計においては瞬間的に極端に大きな制御電力が発生しないよう注意しなければならない。許容される出力電流とピエゾアクチュエータとの関係（応答速度と出力電流の関係）は、高速ピエゾドライバーカタログ（松定プレジジョン株式会社発行）により以下のように算定される（この場合は、電圧増幅器 HJPZ シリーズ）。

【正弦波駆動時】

$$I_{AVE} = 2.2 \times f \times C \times V_{P-P}$$

$I_{AVE}$  : 定格出力電流(A)

$f$  : 動作周波数(Hz)

$C$  : ピエゾ容量(F)

$V_{P-P}$  : 出力電圧振幅 p-p 値(V)

【パルス駆動時】

$$I_P = \frac{V_{P-P} C}{t}$$

$$I_{AVE} = I_P \times \frac{2t}{T}$$

- $I_p$  : ピーク出力電流(A)
- $I_{AVE}$  : 平均電流(A)
- $t$  : 立ち上がり時間(s)
- $C$  : ピエゾ容量(F)
- $T$  : 繰り返し周期(s)
- $V_{p-p}$  : 出力電圧振幅  $p-p$  値(V)

実験で使用するピエゾアクチュエータのタイプは、AE2525D15 である。このタイプの性能は、カタログより  $C=30.5(\mu F)$  で、推奨駆動電圧は  $V=100(V)$  とする。ピエゾ高速ドライバーの特性は、 $I_{AVE}=200(\text{DC 時 } 100)(\text{mA}_{AVE})$ ,  $I_p=600(\text{DC 時 } 300)(\text{mA})$  である。また、固有振動数は  $f=25.1(\text{Hz})$  である。

・正弦波駆動時とした場合

$$I_{AVE}=2.2*25.1*30.5*10^{-6}*100=0.168(\text{A})=168(\text{mA}) > 100(\text{mA}_{AVE}) \text{ (HJPZ-0.15P} \times 3 \text{ の場合)}$$

$$V_{p-p}=100*10^{-3}/(2.2*25.1*30.5*10^{-6})=59.3(\text{V})$$

・パルス駆動時とした場合

$$I_p=100*30.5*10^{-6}/10^{-3}=3.05(\text{A})=3050(\text{mA}) > 300(\text{mA}) \text{ (HJPZ-0.15P} \times 3 \text{ の場合)}$$

$$V_{p-p}=300*10^{-3}*10^{-3}/(30.5*10^{-6})=9.84(\text{V})$$

以上より、AE2525D15 のピエゾアクチュエータを用い、正弦波駆動をするには  $V_{p-p}=45+59.3/2 \approx 75(\text{V})$  が上限駆動電圧値と考えられる。

## 6. 実験結果

初めに正弦波、ランダム波、インパルス波入力による制御実験の応答時刻歴を図 6.1~6.3 に示す。各図には上から非制御応答結果、FB 制御応答結果、FB+FF 制御応答結果の順で示している。また、各制御実験結果について、正弦波加振では最大応答値を、ランダム波加振では最大応答値と標準偏差値を、インパルス波加振では初期応答値について表 6.1 に示す。ここで、正弦波加振は定常状態の場合について示している。

次に図 6.4~6.6 では、各入力波による FF+FB 制御における制御電圧について示す。この制御電圧は、上段に FB 制御器で計算された制御電圧、中段に FF 制御器で計算された制御電圧及び下段に FF+FB

制御で必要とする制御電圧を示している(ただし、この値はピエゾドライバーによる増幅のない、制御器で計算されたままの値を表示している)。

最後にランダム波入力による外乱から制御量までの開ループ伝達関数  $P_{dy}$  を図 6.7 に示す。伝達関数は非制御応答、FB 制御応答、FB+FF 制御応答について示している。

### (1) 正弦波加振による実験結果

正弦波加振では、非制御の応答最大値に対して FB 制御で約 1/8 に、FF+FB 制御で約 1/14 程度に応答値が低減し、高い制御効果を得ている。また FF+FB 制御で使用される制御電圧は、初期制御においては FF 制御器で計算された制御電圧、FB 制御器で計算された制御電圧ともに同程度の必要制御電圧を示している。しかし、定常状態においては FF 制御器で計算された制御電圧が必要制御電圧のほぼ全体の 80%程度を示しており、FB 制御器で計算された制御電圧は 20%程度となっている。これは、設計した制御システムが、FF 制御力のみで応答を制御するとした設計理論に基づくためであり、理論の妥当性を示すものといえる。

### (2) ランダム波による実験結果

ランダム波加振では、非制御の応答最大値に対して FB 制御で約 1/2.7 に、FF+FB 制御で約 1/3 程度に応答値が低減している。また、非制御時の標準偏差値に対して FB 制御で約 1/2.8 に、FF+FB 制御で約 1/3.4 と応答のバラツキが小さくなっている。これより、FF 制御はランダム波加振でもある程度制御効果を得ることができたとと言える。また、FF+FB 制御で使用される制御電圧をみてみると、FB 制御負担電圧は非制御時の応答時刻歴にほぼ相似な形状を示し、FF 制御負担電圧は時刻歴中余り変化のないほぼ同じ大きさを示している。そのため、FF+FB 制御の効果を比較した場合にそれほど大きな差が生じなかったものと考えられる。

表 6.1 制御実験結果一覧

単位:  $\text{m/sec}^2$

	正弦波	ランダム波		インパルス波			
	最大値	最大値	r.m.s	1回目正負	2回目正負	3回目正負	4回目正負
非制御	0.138 (1.0)	0.054 (1.0)	0.0157 (1.0)	-0.0166/0.0168 (1.0)/(1.0)	0.0266/-0.0239 (1.0)/(1.0)	-0.0142/0.0186 (1.0)/(1.0)	0.0225/-0.0217 (1.0)/(1.0)
FB制御	0.018 (1/7.7)	0.02 (1/2.7)	0.0056 (1/2.8)	-0.0164/0.0155 (1/1.01)/(1/1.08)	0.0249/-0.0190 (1/1.07)/(1/1.26)	-0.0178/0.0151 (1/0.80)/(1/1.23)	0.0205/-0.0193 (1/1.10)/(1/1.12)
FF+FB制御	0.01 (1/13.8)	0.018 (1/3.0)	0.0046 (1/3.4)	-0.0076/0.0110 (1/2.19)/(1/1.53)	0.0127/-0.0112 (1/2.09)/(1/2.13)	-0.0061/0.0130 (1/2.33)/(1/1.43)	0.0107/-0.0125 (1/2.10)/(1/1.74)

(3) インパルス波による実験結果

インパルス波加振では、非制御の初期応答値に対してFB制御で平均約1/1.08に、FF+FB制御で同じく約1/1.94程度に応答値が低減している。これは、インパルス波加振による非制御の初期応答のFB制御で約10%、FF+FB制御で50%程度の制振効果を得ている。これは急激な外乱の入力に対しFB制御では対応できず、FF制御で有効的な制御を行えることを示しており、FF制御器の設計次第でより効率的な制御が期待できることを示している。また、FF+FB制御で使用される制御電圧をみてみると、FB制御負担電圧、FF制御負担電圧共にほぼ同一時刻で初期応答に対する制御電圧を出力しており、その和がFF+FB制御電圧となっている。そのため、FB制御の応答値よりFF+FB制御の応答値がかなり小さくなったものと考えられる。

以上(1),(2),(3)より、正弦波、ランダム波およびインパルス波加振による各応答において、FF+FB制御はいずれもFB制御より良い制御効果を得ることを確認できた。特に、正弦波に対する制御効果は、FB制御にFF制御を併用することによって非常に良い制御効果を得る事が出来た。また、インパルス波応答に対する初期応答制御効果の問題は、FB制御にFF制御を併用することによって、かなり有効な制御効果が得られるようになった。全体として、FB制御にFF制御を併用する制御システムにより、正弦波、ランダム波に対する応答を制御できるばかりでなく、インパルス波に対する初期応答制御にも効果的であることを確認できた。

7. まとめ

FB制御にFF制御を併用する制御システムを用いた制御実験により、正弦波、ランダム波、インパルス波に対する各応答制御について良い制御効果が得られた。正弦波加振時においては、FB制御により1/8に低減され、FF制御を加えたFF+FB制御で約1/14程度となった。特に、インパルス波加振における制御で初期応答に対する制御の場合、FB制御のみではほとんど制御効果が得られなかったが、FF制御を併用する事によって約1/2程度に低減する事ができた。また、他の入力外乱に対してもFB制御のみより制御効果を高めることができ、FF制御の併用が全体的により効果的な制御システムとできることを確認した。

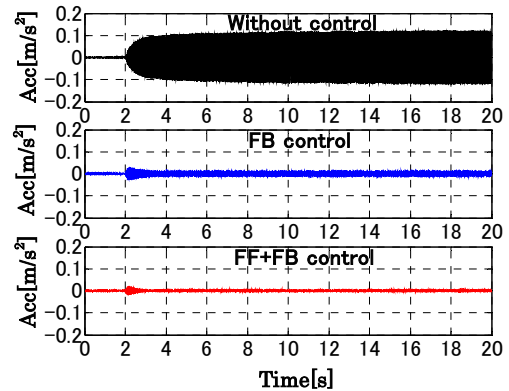


図 6.1 正弦波加振応答時刻歴

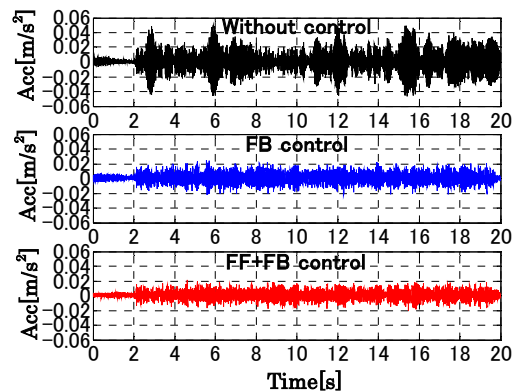


図 6.2 ランダム波加振応答時刻歴

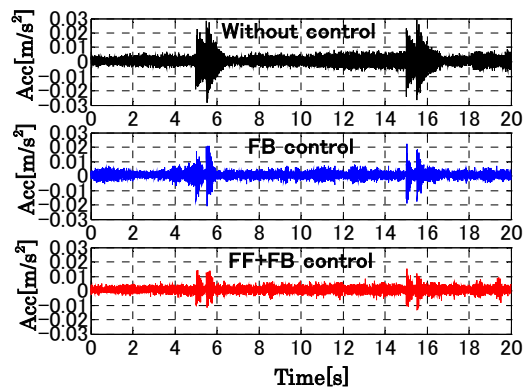


図 6.3 インパルス波加振応答時刻

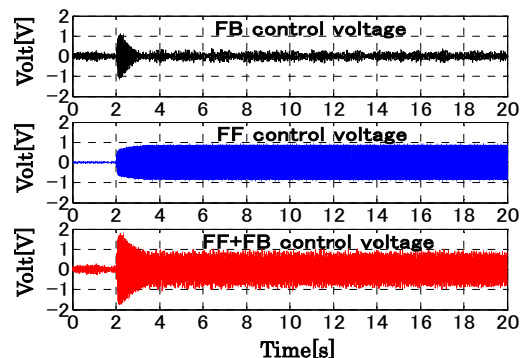


図 6.4 正弦波加振時制御電圧時刻歴

## 参考文献

- [1] 野波健蔵,西村秀和:MATLABによる制御理論の基礎,東京電機大学出版局
- [2] 野波健蔵,西村秀和,平田光男:MATLABによる制御系設計,東京電機大学出版局
- [3] 積層圧電アクチュエータ,Token,Vol1.1,Nov.2000,p.2-5
- [4] 志賀敏男:構造物の振動,共立出版株式会社,p.210-211
- [5] 藤田隆史他:積層型 piezo アクチュエータを用いたスマート構造による梁のアクティブ制振に関する研究,日本機械学会論文集 (C編),61巻584号(1995-4),P.1337-1342
- [6] 鎌田崇義他: piezo アクチュエータを用いたスマート構造による骨組構造物のアクティブ制振に関する研究 (第1報,柱の曲げモーメント制御による場合),日本機械学会論文集 (C編),62巻599号(1996-7),P.2577-2584
- [7] 鎌田崇義他: piezo アクチュエータを用いたスマート構造による骨組構造物のアクティブ制振に関する研究 (第2報,柱の曲げモーメント制御と軸力制御の併用による場合),日本機械学会論文集 (C編),63巻615号(1997-11),P.3743-3750
- [8] 藤田隆史他:スマート構造による弾性支持されたはりのアクティブ微振動制振の研究,日本機械学会論文集 (C編),65巻630号(1999-2),P.493-498
- [9] 藤田隆史他: piezo アクチュエータを用いたスマート構造による精密生産施設のアクティブ微振動制振,日本機械学会論文集 (C編),66巻647号(2000-7),P.2122-2127
- [10] 別所智彦:リニアモータを用いた高層建物制振用アクティブ・マスダンパの制御手法に関する研究,東京大学修士論文,P.39-44
- [11] 神永敏幸他:鉄骨造建物の鉛直微振動制御に関する研究 (その2  $H_\infty$ 制御理論を用いたアクティブ微振動制御),安藤建設技術研究所報,vol.8 2002,P.25-32

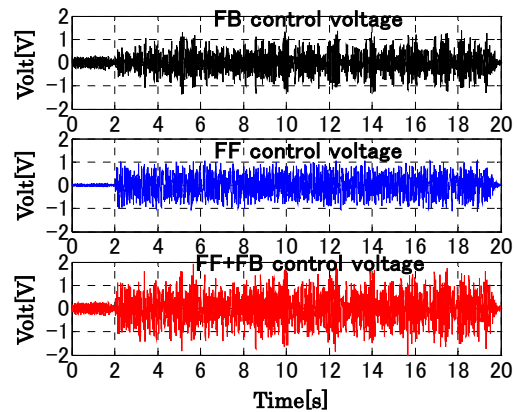


図 6.5 ランダム波加振時制御電圧時刻歴

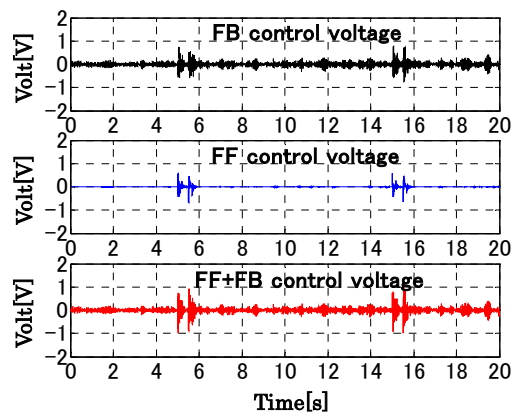
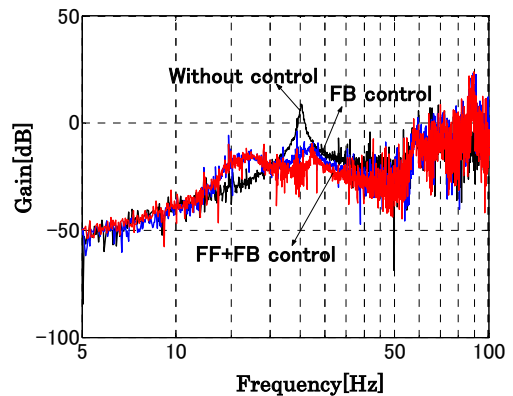


図 6.6 インパルス波加振時制御電圧時刻歴

図 6.7 ランダム波加振時伝達関数  $P_{dy}$

