

学位論文 博士（工学）

建物機能維持を目的とした  
地震応答制御の評価関数設計法

2014年3月

慶應義塾大学大学院理工学研究科

三浦 奈々子

# 建物機能維持を目的とした 地震応答制御の評価関数設計法

## 論文要旨

1995年の兵庫県南部地震以降、建物の免震化や制振装置の導入が進み、その効果による建物構造の被害低減について報告がなされている。しかし、建物構造の損傷を免れたとしても、主要な設備機器や非構造部材が損傷した場合、事業継続・生活継続の大きな支障となり、これらの耐震性能の評価・改善が極めて重要となる。

本論では地震を対象とした建物のアクティブ振動制御について、設備機器や非構造部材を含めた建物機能維持の観点からの評価関数設計法を提案することを目的とした。建物機能維持に関する評価項目として「被害低減・早期復旧・継続稼働」を設定し、これらの評価を「建物の機能維持率・振動応答の収束速度・単位エネルギーあたりの最大応答の低減率」により行った。これらの評価項目の達成度を向上させる評価関数の設計方法を提案し、制御性能を数値解析により検証した。

第1章では、本論文に関わる背景と目的を述べた。

第2章では、建物構造だけでなく主要設備機器等を含めた被害低減を行うために、まず、建物機能の構成要素を建物構造と主要設備機器等と考え、それぞれの被害発生確率とその影響度から計算される機能維持率を導入した。そして、建物構造と主要設備機器等の双方を考慮した見通しの良い制御設計を行うために、最適レギュレータにおける評価関数の複数の制御量項の構成法を提案した。制御量項における次元の取り扱いにより、次元の異なる複数の制御量が存在する場合においても応答低減の重要度を制御に反映させることを容易とした。数値解析により、機能維持率の向上を確認した。なお、ここで提案した制御量項の構成法を第3章、第4章でも用いた。

第3章では、振動によって停止した設備機器の早期復旧（例えばエレベータの地震時管制運転からの再稼働）のために振動応答の収束速度の向上を考え、後揺れ時に有効に装置能力を使用する手法として、制御目的をスケジューリングし、さらに制御力の推定から、最適レギュレータの制御ゲインを更新する可変ゲインフィードバック制御を提案した。制御力については、モーダルアナリシスを参考に、到達した地動加速度の区分波形を用いた推定式を立式した。数値解析により振動応答の収束性が向上することを確認した。

第4章では、制御システムにおいてエネルギーが不足することなく、継続的に制御を行うことができるように、単位エネルギーあたりの最大応答の低減効果の高いエネルギー最適制御を、建築分野の振動制御へ適用する場合、評価関数の構成要素として制御対象の散逸エネルギー、制御量および制御に必要なエネルギーを設定すればよいことを提示した。そしてエネルギー最適制御に基づく手法と同様に、最適レギュレータでエネルギーを評価関数内で陽に考慮した場合と消費エネルギーや応答低減効果に関する比較を行った。

第5章では、以上の内容をまとめ、本論文の結論を述べた。

# Cost Function Design of Seismic Vibration Control for Building Function Continuity

## SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

The purpose of this dissertation is to design a cost function of an active seismic vibration control for the continuity of building functions that considers structural and nonstructural components and capital equipment. If a building avoids structural damage during an earthquake, the damage of other capital components can make business or life continuity difficult. Three evaluation indexes are introduced in this dissertation: damage reduction, early resilience, and continuous operation. These are evaluated by function maintenance rate, damping performance, and energy efficiency respectively. Cost functions are proposed to improve the performance of these indexes. The control performance of the proposed method is verified through numerical simulation.

Chapter 1 introduces this dissertation and describes its background.

Chapter 2 describes a control design method considering both structural and functional damage reduction. To reflect the importance of each control objective for multi-objective optimization, control objectives are expressed as dimensionless numbers using performance objectives (or reference responses) and vector sizes. The function maintenance rate, which is calculated using an occurrence probability and an influence rate, is improved by the proposed cost function. Details on the cost function are included in Chapters 3 and 4.

In Chapter 3, a variable gain feedback control is designed to improve damping performance. The control objectives are scheduled in the proposed method and the maximum control force is estimated on the basis of a modal analysis to efficiently use the control device during aftershocks. The damping performance is improved by adjusting the controller feedback gains.

Chapter 4 describes a control that can improve reduction rate of the maximum response per unit energy to operate control devices continuously without recharging. An energy optimal control that considers the dissipation of energy, control objectives, and energy consumption in its cost function is applied for building vibration control. The dissertation confirms that the proposed controller can be designed clearly, and then reduce both energy and response in comparison with the Linear Quadratic Regulator considering energy consumption.

The conclusions are provided in Chapter 5.

## 目次

目次	i
図目次	iii
表目次	v
第1章 序論	1
1.1. 過去の震災と地震防災計画	2
1.1.1. 過去の巨大地震における設備機器の被害	2
1.1.2. 地震防災計画と建物機能継続	4
1.2. 建物機能継続へのアプローチ	4
1.2.1. 本論における建物機能継続の定義と評価方法	4
1.2.2. 従来の振動制御技術と建物機能維持	6
1.3. 本論文の目的	7
1.4. 本論文の構成	11
第2章 被害低減に向けた無次元化評価関数に基づく制御系設計	13
2.1. 緒言	14
2.2. 無次元化評価関数の提案	15
2.3. 検証解析	16
2.3.1. 制御系設計モデル	16
2.3.2. 無次元化評価関数	19
2.4. 解析結果と考察	21
2.4.1. 解析概要	21
2.4.2. 制御特性	22
2.5. 無次元化における $D(z)$ の効果の検証	27
2.5.1. 2.3.1 項の解析対象による検証	27
2.5.2. 別解析対象による検証	27
2.6. 建物機能維持率の評価	32
2.7. 結言	32
第3章 早期復旧に向けた最大要求制御力の推定に基づく可変ゲインフィードバック制御	34
3.1. 緒言	35
3.2. 制御系設計モデル	35
3.3. LQR 制御の制御特性と周波数整形 LQG 制御の定式化	40
3.4. 地震動強さと建物の応答レベルに順応する可変ゲイン制御の提案	48
3.4.1. 評価関数の設計	48
3.4.2. ゲイン更新手法（比較手法）	56
3.4.3. ゲイン更新手法（提案手法）	59
3.5. 検証解析	65

## 目次

3.6.	結言.....	70
3.7.	謝辞.....	71
第4章	継続稼働に向けたエネルギー最適制御理論の建築分野における設計指針.....	72
4.1.	緒言.....	73
4.2.	エネルギー最適制御の定式化.....	73
4.3.	検証解析.....	75
4.3.1.	制御系設計モデル.....	75
4.3.2.	制御設計.....	76
4.3.3.	解析結果.....	77
4.4.	最適レギュレータによるエネルギー回生を可能とする制御設計.....	83
4.4.1.	相対変位・相対速度・絶対加速度による設計.....	83
4.4.2.	最適レギュレータにおけるエネルギー最適制御の評価関数の記述.....	87
4.5.	結言.....	88
第5章	結論.....	89
5.1.	総括.....	90
5.2.	今後の展望.....	91
参考文献	.....	92
謝辞	.....	100
付録	.....	102
A.	2章の付録.....	102
A.1	免震層の非線形モデル.....	102
A.2	検証解析.....	103
著者論文目録	.....	106

图目次

Figure 1-1	System model <sup>[17]</sup> .....	5
Figure 1-2	Functional maintenance rate.....	5
Figure 1-3	General idea of electric power regeneration for reuse <sup>[70]</sup> .....	10
Figure 1-4	Overview of this dissertation.....	12
Figure 2-1	Analysis model.....	18
Figure 2-2	Time history responses and control force controlled by building & equipment control.....	24
Figure 2-3	Time history responses and control force controlled by building control.....	25
Figure 2-4	Frequency responses of building controlled by building & equipment control.....	26
Figure 2-5	Frequency responses of building controlled by building control.....	26
Figure 2-6	Frequency responses of equipment absolute acceleration.....	26
Figure 2-7	Frequency responses of isolation layer drift.....	26
Figure 2-8	Analysis model.....	29
Figure 2-9	Frequency responses of building (with $D(\mathbf{z})$ ).....	30
Figure 2-10	Frequency responses of isolation layer (with $D(\mathbf{z})$ ).....	30
Figure 2-11	Frequency responses of building (without $D(\mathbf{z})$ ).....	30
Figure 2-12	Frequency responses of isolation layer (without $D(\mathbf{z})$ ).....	30
Figure 2-13	Event tree and functional maintenance rate of building.....	31
Figure 3-1	Analysis model.....	39
Figure 3-2	Filters.....	44
Figure 3-3	Frequency responses of building acceleration.....	45
Figure 3-4	Frequency responses of building interstory drift.....	46
Figure 3-5	Frequency responses of rope displacement.....	47
Figure 3-6	Frequency responses of building interstory drift.....	50
Figure 3-7	Frequency responses of rope displacement.....	50
Figure 3-8	Comparative analysis of constant objective and variable objective.....	51
Figure 3-9	Undamped modal participation vectors.....	52
Figure 3-10	Feedback gains.....	55
Figure 3-11	Variable gain feedback control system.....	56
Figure 3-12	Flowchart of algorithm .....	58
Figure 3-13	Flowchart of algorithm .....	59
Figure 3-14	Flowchart of algorithm -A.....	60
Figure 3-15	Flowchart of algorithm -B.....	60
Figure 3-16	Displacement response spectra (Damping factor 0.01).....	64
Figure 3-17	Central frequency and peak acceleration of ground motion.....	67
Figure 3-18	Time-history responses: Algorithm .....	68

## 目次

---

Figure 3-19	Time-history responses: Algorithm	69
Figure 3-20	Calculation value of control force.	70
Figure 4-1	Analysis model.	75
Figure 4-2	Input waves.	78
Figure 4-3	Time history ( $\kappa=1$ , Input: Response wave).	79
Figure 4-4	Time history ( $\kappa=0.1 \sim 10$ , Input: Response wave).	80
Figure 4-5	Consumption energy ( $\kappa=1$ , Input: Response wave).	81
Figure 4-6	Plot of control performance vs. $\kappa$ .	82
Figure 4-7	Maximum responses, control force and consumption energy using LQR control.	85
Figure 4-8	Maximum responses, control force and consumption energy using energy optimal control.	85
Figure 4-9	Comparative analysis of LQR control and energy optimal control.	86
Figure 4-10	Maximum responses, control force and consumption energy using cross term of LQR control.	87
Figure A-1	Restoring force characteristics of isolation with viscous damper <sup>[115]</sup> .	102
Figure A-2	Restoring force characteristics of isolation with viscous and hysteretic dampers <sup>[115]</sup> .	102
Figure A-3	Bilinear model.	103
Figure A-4	Viscous damper (Chapter 2).	104
Figure A-5	Laminated rubber bearing and viscous damper (Chapter 2).	104
Figure A-6	Dampers.	104
Figure A-7	Laminated rubber bearing, viscous damper and hysteretic damper.	104

## 表目次

Table 1-1	Earthquake damage estimation of capital stock <sup>[1]</sup> .....	2
Table 1-2	Evaluation items for Building Function Continuity.....	4
Table 2-1	Physical parameters.....	18
Table 2-2	Stiffness coefficient of building.....	18
Table 2-3	Natural periods and damping factors.....	19
Table 2-4	Performance objectives.....	23
Table 2-5	Uncontrolled maximum responses and reference maximum responses.....	23
Table 2-6	Ratio of maximum response to reference maximum response.....	23
Table 2-7	Ratio of maximum response to performance objective.....	23
Table 2-8	Ratio of RMS value to reference maximum response.....	23
Table 2-9	Ratio of maximum response to reference maximum response.....	27
Table 2-10	Physical parameters.....	29
Table 2-11	Natural periods and damping factors.....	31
Table 2-12	Uncontrolled maximum responses.....	31
Table 2-13	Influence rate <sup>[18]</sup> .....	31
Table 2-14	Functional maintenance rate of building.....	32
Table 3-1	Physical parameters.....	39
Table 3-2	Stiffness coefficient of building.....	40
Table 3-3	Natural periods and damping factors.....	52
Table 3-4	Parameters for variable gain.....	55
Table 3-5	Parameters for Algorithm.....	58
Table 3-6	Displacement gains and velocity gains.....	61
Table 3-7	Parameters for Algorithm.....	65
Table 3-8	Response ratios of maximum responses and RMS values.....	70
Table 4-1	Physical parameters of seismic floor isolation model.....	76
Table 4-2	Physical parameters of building model.....	76
Table A-1	Physical parameters.....	103
Table A-2	Maximum responses.....	105



## 第1章 序論

1.1. 過去の震災と地震防災計画

1.1.1. 過去の巨大地震における設備機器の被害

過去の震災における社会インフラ等の資本ストックの被害額が、内閣府により Table 1-1 のように報告されている<sup>[1]</sup>。これによるとストック被害の内訳は、特に建築物等や社会基盤施設の被害額が大きい。建物の地震被害については、地震動によって被害が生じた場合（津波や火災による被害を除く）、その被害は構造的な被害と非構造部材や設備機器の被害に分類される。非構造部材や設備機器の被害は震源から離れた地域でも生じる。2011 年の東北地方太平洋沖地震における首都圏の最大震度は 5 強であったが、長周期地震動や大きな余震により、建物各部で多数回の繰り返し変形が生じた。振幅が比較的小さかったため構造的被害は生じなかったが、非構造部材の被害や設備機器の被害、通話回線の輻輳等により、混乱した状況が発生した。また家具類の移動・転倒・落下等の室内被害も生じた<sup>[2]</sup>。ここでは設備機器の被害についての概要をまとめる。

(1) 精密設備機器（コンピュータールーム・医療施設）の被害

近年の情報通信技術の進歩は目覚ましく、生活の場や、企業、自治体の業務遂行の場において、その大半は情報システムに依存している。これらの情報システムの稼働に必要なコンピュータや情報通信装置は、稼働環境が整えられた運用性の高い専用室に集約されるのが当たり前となり、重要かつ大量の情報資産をコンピュータールームが支えている状態にあるといえる。したがって、情報システムが停止すれば、生活環境や企業活動に多大な支障をもたらす。2011 年東北地方太平洋沖地震の際には、首都圏では 10 分を超える長い時間の長周期地震動により、オフィスビルや複合用途ビル中に構築されたコンピュータールームでは既存の地震対策措置では追従できずに情報システム機器の移動や転倒、免震装置の

Table 1-1 Earthquake damage estimation of capital stock<sup>[1]</sup>.

	東日本大震災	新潟県中越地震	阪神・淡路大震災	
	内閣府防災担当推計 (2011 年 6 月)	新潟県推計 (2004 年 11 月)	国土庁推計 (1995 年 2 月)	兵庫県推計 (1995 年 4 月)
建築物等 (住宅・宅地, 店舗・事務所・工場, 機械等)	約 10 兆 4 千億円	約 7 千億円	約 6 兆 3 千億円	約 5 兆 8 千億円
ライフライン施設 (水道, ガス, 電気, 通信・放送施設)	約 1 兆 3 千億円	約 1 千億円	約 6 千億円	約 6 千億円
社会基盤施設 (河川, 道路, 港湾, 下水道, 空港等)	約 2 兆 2 千億円	約 1 兆 2 千億円	約 2 兆 2 千億円	約 2 兆 2 千億円
その他	約 3 兆円	約 1 兆円	約 5 千億円	約 1 兆 3 千億円
総計	約 16 兆 9 千億円	約 3 兆円	約 9 兆 6 千億円	約 9 兆 9 千億円

被害等が発生した<sup>[3], [4]</sup>。

また、大地震時には多くの負傷者が出る恐れがあり、地震直後にも病院の診療機能を確保することが社会的に強く求められている。病院の診療機能を低下させる原因として、施設・設備の損傷が挙げられる<sup>[5]</sup>。例えば、CT スキャナーや MRI 等の重量機器は通常設置床面にアンカーボルト等で固定されているが、地震による損傷が報告されている<sup>[6], [7]</sup>。また、精密機器は振動により故障が発生しうるため、医療機器への振動入力を低減することが望まれる。そのため、機器の固定に加えて、機器への振動入力低減対策が重要といえる。

## (2) エレベータの被害

近年、地震によりエレベータが損傷する事例が多く報告されている<sup>[8], [9]</sup>。消火・救援活動や高齢者・障害者等の避難のため、また、高層階の住民の生活に支障をきたさないためにも、地震後のエレベータの機能維持は重要といえる。東京消防庁は 2013 年 10 月より、避難にエレベータを活用するという指針を示した<sup>[10]</sup>。これは住民の高齢化とマンションの高層化がともに進んでいるためである。不動産調査会社の東京カンテイによると、全国にある 20 階建て以上の高層マンションは東京都内だけでなく全国で増えており、2000 年に 272 棟であったのが 2013 年 7 月末には 1088 棟に上っている<sup>[11]</sup>。超高層建物では建物の固有周期とエレベータロープの固有周期が低次モードで近接するため、エレベータロープが振動しやすい。エレベータの昇降路内には、かご室の昇降に伴って移動する主ロープ、ケーブル等の長尺物がある。これら長尺物には通常ガイドがなく、平常時でも多少は振動しているが、地震時には建物の振動により大きく振動することがある。これはロープスウェイ問題と呼ばれている。この振動が大きくなると、昇降路のレールブラケットや昇降路内設置機器の取り付け金具等の突出物に、長尺物が接触し引っ掛かる被害が発生する<sup>[12]</sup>。2004 年の新潟県中越地震では震源地から約 200 km 離れた東京都内の高層および超高層ビルにおいてエレベータロープ等の長尺物が長周期地震動と共振し数分間揺れ、昇降路内の機器に絡まる等の不具合を発生させ、復旧にかなりの時間を要した<sup>[8]</sup>。また、2011 年東北地方太平洋沖地震においても、震源から遠く離れた大阪湾岸の超高層建物が地震動との共振により、エレベータをはじめ、大きな被害を受けた<sup>[13]</sup>。このように、エレベータの安全性の向上の他に災害後の復旧時間の短縮や地震時損傷の低減という面からも、エレベータロープの振動を抑制する必要がある。

## (3) 電気系統の被害

大規模な地震においては電気系統の被害による停電が発生することが多い。1995 年の兵庫県南部地震では、送変電設備、配電設備の被害により、兵庫県南東部、大阪府北部、淡路島を中心に 260 万軒の需要家で停電が発生した<sup>[14]</sup>。また、2011 年の東北地方太平洋沖地震では東北地方だけでも、宮城県で 146 万軒、青森県で 90 万軒、岩手県で 80 万軒、秋田県で 67 万軒、山形県で 53 万軒、福島県で 37 万軒の停電が報告されている<sup>[15]</sup>。

今後、さらに大きな揺れが予測されている南海・相模トラフの巨大地震等では、構造・非構造部材や設備機器の被害が多発し、多くの住民が居住できない状況が生じる可能性がある。

Table 1-2 Evaluation items for Building Function Continuity.

	Evaluation index	Evaluation item	Chapter
(1) Damage reduction	Functional maintenance rate	Maximum response	Chapter 2
(2) Early resilience	Damping performance	RMS value	Chapter 3
(3) Continuous operation	Energy efficiency	Consumption energy	Chapter 4

### 1.1.2. 地震防災計画と建物機能継続

1.1.1 項では、これまでに発生した地震被害について述べた。したがって、建物において大地震時に確保しなければならない基本的機能は下記の 4 項目<sup>[16]</sup>であるといえる。

人命の安全確保

重大な財産損害の防止

地震後の速やかな復旧

重要施設・設備の稼働確保

建物の構造的な被害が無い場合においても非構造部材や設備機器の被害により、この項目のすべてが危ぶまれる。したがって、人命の安全確保・避難・事業継続計画(BCP: Business Continuity Plan)の観点から、地震防災計画として建物構造だけでなく主要設備も考えることが重要となる。建築・都市機能継続に関して、日本建築学会による東日本大震災の第二次提言(以降、提言)の 39<sup>[21]</sup>「建物機能継続計画(Building Function Continuity Plan)」策定の推進とその標準化では、暮らしの場と働く場の双方を守る観点から、オフィスビル・業務系建物の BCP や高層マンションの生活継続計画(LCP: Life Continuity Plan)に対応した高機能建物を実現し、災害時においてもエリア内で拠点となる建物の機能を適切に維持することが重要であること。またそのために、建物構造や各種設備、施設管理や燃料・資機材の調達等を含めた総合的な観点から、建物機能継続計画を策定し、施設ごとに運用するための調査研究を推進する必要があるということが述べられており、構造・非構造部材や設備機器等を含めた耐震性能評価法と技術の開発が求められている。

## 1.2. 建物機能継続へのアプローチ

### 1.2.1. 本論における建物機能継続の定義と評価方法

1.1.2 項で述べたように、大地震の際、建物構造の損傷を免れたとしても、天井材や内外装材などの非構造部材や主要な設備機器等が損傷した場合、事業継続・生活継続の大きな支障となり、これらの耐震性能の評価・改善が極めて重要となる。そこで本論では建物機能継続に関して Table 1-2 に示す 3 つの評価項目「(1)被害低減(Damage reduction)・(2)早期復旧(Early resilience)・(3)継続稼働(Continuous operation)」を設定することにより、建物の機能継続の面から有効なアクティブ振動制御についての提案を行う。なお、評価項目の番号(1)~(3)は 1.1.1 項に示した被害事例の番号(1)~(3)にそれぞれ対応しており、対応する被害の低減を目的としている。各項目の詳細を以下に示す。

#### (1) 被害低減

建物が与えられた機能を保つためには建物の構造的被害とともに主要な機能の被害を防

が必要がある．本論では建物機能が Figure 1-1 に示すような建物構造と建物内の主要な機能にかかわる設備機器の直列システム<sup>[17]</sup>であると考え，その機能維持率<sup>[18]</sup>(Functional maintenance rate)を高めることを被害低減のための目的とする．ここで直列システムとは，システムの構成要素が 1 つでも被害を受けると全体として機能を失うシステムを意味する．建物の機能維持率の算出方法を Figure 1-2 に示す．ここで発生確率  $P_k$  は被害発生の閾値をシステムごとに設け，それに対する最大応答の超過確率として与える．影響度係数  $F_k$  は損傷状態における復旧期間や費用<sup>[18],[19]</sup>を参考に与えるものとする．機能維持率を高めることにより，例えば 1.1.1 項(1)精密設備機器（コンピュータールーム・医療施設）の被害において，建物が構造的な被害を受けていないものの，重要な設備機器が故障してしまう状況の発生低減が可能となる．

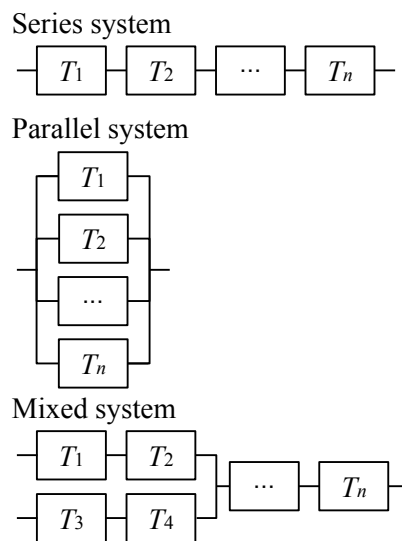


Figure 1-1 System model<sup>[17]</sup>.

Structure (S)	Equipment (E)	Event probability ( $P_k$ )	Influence rate ( $F_k$ )
0	0	$P_{S0} \times P_{E0}$	0
X	1	$P_{S0} \times P_{E1}$	$F_E$
	0	$P_{SX} \times P_{E0}$	$F_{SX}$
	1	$P_{SX} \times P_{E1}$	$\max(F_{SX}, F_E)$
1	1	$P_{S1} \times P_{E1}$	$\max(F_S, F_E)$
		$\sum_k P_k = 1$	$R_f = 1 - \sum_k (P_k F_k)$

Figure 1-2 Functional maintenance rate.

## (2) 早期復旧

建物や内部の設備機器の振動の収束速度(Damping performance)を上げることによって、非常停止した機能の回復を早めることを目的とする。収束速度については評価時間を設定し、応答の二乗平均平方根(RMS: Root Mean Square)の値が小さいほど早いと評価できる。収束速度を上げることにより、例えば 1.1.1 項(2)エレベータの被害において、エレベータロープの振動が早く収まれば、早く再稼働させることが可能となる。また、エレベータの昇降路の幅は規格上 1.5 ~ 2.3 m と決められているため、ロープがその幅を超えて振動する時間に着目して、昇降路内への引っ掛かりや衝突の危険性を検討することができる<sup>[20]</sup>。この観点からも、減衰性能の向上は引っ掛かりや衝突の発生の低減につながり、早期復旧に貢献する。

## (3) 継続稼働

1.1.1 項(3)電気系統の被害に示すような電気系統の被害による停電が発生した場合にも、健全に稼働できる振動制御システムを構築することを目的とする。ここでは単位エネルギーあたりの最大応答の低減効果(Energy efficiency)の高いシステムとすることにより、消費エネルギーの低減・継続的な稼働の実現を行う。アクティブ制御を行う場合にはその消費エネルギーが問題となることが多く、外部電源が断たれた場合に、所望の応答低減効果を発揮することができないことなどがアクティブ制御の実用化を阻害する原因の一つに挙げられる。実際、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では関東地方で大規模な停電が起き、セミアクティブ免震が機能しなかった事例<sup>[21]</sup>が報告されている。また、消費エネルギーの低減の効果は、余震や継続時間の長い長周期地震動を受ける場合等、使用できるエネルギー量が限定される状況下で特に重要となる。そのため、最大応答の低減といった制御性能に加えて、エネルギーが不足することなく、制御が継続的に可能であることは重要といえる。

### 1.2.2. 従来の振動制御技術と建物機能維持

建物の振動制御には大きく分けて免震と制振があるが、いずれも耐震を基にして、それぞれ免震と制振の機能を付加している。また、このうち、免震・制振については大きくパッシブ制御・セミアクティブ制御・アクティブ制御の 3 つに分類される。耐震は、人命の保護については必要な性能を与えられるが、激しい振動によって機能維持が困難な場合もあり、塑性変形による損傷を免れない。これに対して免震は上部構造の床応答加速度を低減することにより建物の機能を維持し、上部構造の変形制御により損傷防止も可能となる。制振は、振動制御レベルに応じて機能維持と損傷防止を図ることが可能である<sup>[22]</sup>。したがって、建物の機能継続を議論するにあたり、本論では免震・制振について取り扱い、特にそのアクティブ制御について定式化を行う。

免震・制振と建物機能維持に関する既往研究について以下に示す。

#### ● 免震と建物機能維持

1995 年の兵庫県南部地震以降、建物の免震化や制振装置の導入が進み、日本免震構造協会によると、免震建物は兵庫県南部地震以前には約 100 棟であったが、2009 年にはビル・マンションで約 2,600 棟、戸建て住宅で約 4,000 戸と急増している<sup>[23]</sup>。そして免震建物に

については佐藤ら<sup>[24]</sup>による実大震動台実験により、短周期地震動を入力した場合、免震効果により非常に高い機能維持性能が実現できることが示されている。一方で、長周期地震動を入力した場合には、地震動の卓越周期と免震建物の固有周期が近接しているとキャストー機器の大きな移動等が発生し、それによって周囲の機器などに衝突し損傷する状況が多数確認されている。

また現在では、建物全体ではなく、機器類（サーバ等の精密機器）や文化財等に対して機器免震や床免震が導入されてきている。機器免震に対しては低いレベルの地震動に対して解析や実験によりその効果が示されている<sup>[25], [26], [27]</sup>が、パッシブな機器免震において免震台が可動範囲の限界値まで変位し、台が可動部の端部に衝突した衝撃で台上のサーバラックが転倒した事例も報告されている<sup>[4]</sup>。

### ● 制振と建物機能維持

免震以外の振動対策として建物や設備機器への制振装置の導入が考えられる。

建物に制振装置を導入することにより建物内部の振動が抑えられ、それにより機能維持性能の向上を図ることができる。さらに、建物の制振装置の制御用評価関数を工夫し、建物内設備機器の機能維持のために活用する手法<sup>[28], [29], [30]</sup>も提案され、縮小試験体を用いた実験による検証<sup>[31]</sup>がなされている。

また直接、設備機器へ制振装置を導入して振動を抑えることも考えられ、例えば、エレベータロープの振動制御では、磁気を用いた非接触制御<sup>[32]</sup>やエレベータロープを直接加振する制御方法<sup>[33], [34]</sup>が提案されている。

日本におけるアクティブ制御（セミアクティブ制御を含む）の適用事例については、2001年に Nishitani and Inoue<sup>[35]</sup>によって報告がされている。またそこでは、強震動に対する制御に関して、今後省エネ対策や高性能制御手法の開発が課題であることが述べられている。制振装置としては、マスダンパが日本で最も適用事例の多いアクティブ制振装置であり、2009年に50以上の適用例が示されている<sup>[36]</sup>。その他のアクティブ制振技術としては、例えば、Kobori et al.<sup>[37]</sup>は建物の剛性を制御することにより、建物を地震動と共振しない状態にして地震応答を低減するアクティブ剛性変化システムを提案している。

制御則に関しては、最適レギュレータ、 $H_2$ 制御、 $H_\infty$ 制御<sup>例えば<sup>[38]</sup></sup>、スライディングモード制御<sup>例えば<sup>[39]</sup></sup>、ファジィスライディングモード制御や可変構造制御(variable structure control: VSC)<sup>[40]</sup>等、多様な手法が建物の振動制御に対して提案・適用されている<sup>[41]</sup>。しかし、アクティブマスダンパ(AMD)の制御手法としては、実用化した制振装置の制御則はすべてフィードバック制御であり、制御理論としては最適レギュレータまたはロバスト制御が用いられている。

### 1.3. 本論文の目的

本論では地震を対象とした建物のアクティブ振動制御について、設備機器や非構造部材を含めた建物機能維持の観点から 1.2.1 項で述べた 3 つの建物機能継続「被害低減・早期復旧・継続稼働」のための評価項目の値の向上を実現する、アクティブ振動制御の評価関数の設計法を提案する。以下に本論における各建物機能継続の評価項目へのアプローチを示

す。

### (1) 被害低減

被害低減については、最適レギュレータの評価関数の制御量項の設計から建物の機能維持率の向上を達成する。

制御に用いる評価関数については、姜・吉田<sup>[42]</sup>が評価関数と制御特性の関係について報告している。またその設定方法については、例えば次のようなものがある。

- 評価関数内の重み係数と制御系の特性根の関係を求め、最適な特性根の値から逆に重み係数を決める方法<sup>[43], [44]</sup>。
- 重み係数を状態量と制御入力の許容レベルから設定する方法<sup>[45], [46]</sup>。
- 状態方程式と出力方程式の係数行列から初期値を与え、試行錯誤を繰り返して決定する方法<sup>[47], [48]</sup>。
- 構造物の損傷はひずみエネルギーと運動エネルギーに依存すると仮定し、評価関数をひずみエネルギーと運動エネルギーに基づき剛性行列および質量行列から設定する方法<sup>[49], [50], [51]</sup>。
- 状態ベクトルに含まれる応答だけではなく、加速度応答に関するペナルティを含む評価関数とする方法<sup>[52]</sup>。
- 重み係数を単位行列の定数倍（全ての状態量に対して同じ重み）として定義し、試行錯誤的に与える方法<sup>[53]</sup>。
- 評価関数をモードメインで設計する方法<sup>[54]</sup>。
- 試行錯誤的なアプローチを用いず、重み係数を制御対象の定常応答と過渡応答との数学的な関係から与える方法<sup>[55]</sup>。

本論では建物と設備機器といった複数のシステムの機能を維持させようとする、複数の制御目的（制御量）が存在する場合について扱う。具体的には、建物の構造的安全性を保ちつつ、建物内設備機器の損傷を防ぐ制御を行うための評価関数の設定方法として、無次元化評価関数における制御量項の構成方法について提案する。建物の被害について、例えば建物の層間変形角を抑え構造的な被害の発生を防ぐことを考える場合、特定層の層間変形角のみを抑える制御の要求は考えにくい。そこで本論では建物の加速度や建物の層間変形角、設備機器の加速度といった制御対象をそれぞれグループ化したベクトルとして考える。そして、無次元化評価関数内においてこれらのベクトルの次元について扱うことで、各応答を平均的に抑えようというコンセプトの設計方法を示す。

これにより、建物構造や設備機器等の応答低減の優先度・重要度を制御に反映することが容易になる。すなわち、建物の機能維持率が向上し、被害を受けた場合でも復旧にかかる期間の短縮が期待できる。

### (2) 早期復旧

早期復旧については、最適レギュレータの評価関数の制御力項の設計から収束速度の向上を達成する。

提言 35<sup>[2]</sup>において「より高い機能維持性を念頭に置いた耐震設計の実現には、揺れの大きさに応じた多段階の機能維持対策メニューを整備することが有効である。」と述べられて



いる．機能維持性に関しては，広義には地域全体で考える必要もある．例えば，社会全体の機能低下が一定未満の際に，重要施設が機能不全に陥ってはならないが，社会全体が壊滅的な被害を受けた際に，重要施設のみが軽微な被害で存在していても，インフラ等の被害により結果的に機能不全となってしまう<sup>[56]</sup>．本論では機能維持性のうち，単一建物における機能維持対策について考え，機能不全となる施設の発生を防ぐことを目的とする．

制御においては装置能力の制約下で制振効果を最大とすることが重要となる．線形の制御則を用いる場合，制御力やストローク等は，外乱の強度に比例する．そのため，ある強度の外乱に対して適切な定数ゲインを定めた場合，想定した強度を下回る外乱に対しては装置能力を少ししか使わない不十分な制御となり，また反対に想定した強度を上回る外乱に対しては制御力の飽和を起こしてしまう．制御力の飽和は制御性能の低下だけでなく，場合によっては制御が不安定となりうる<sup>[57]</sup>ため，装置を停止させる必要が生じる．また，外力が比較的小さくなったときにも装置能力を十分に発揮できることが望ましい．建物の飽和制御に関しては，例えば，制御力が制約内に納まるように制御則を切り替える可変ゲイン制御手法が提案されている<sup>[58], [59], [60], [61], [62], [63]</sup>．

本論では可変ゲイン制御について，地震外力から最大要求制御力の推定を行い，制御ゲインを更新する手法を提案する．これにより，飽和と非制御状態を回避した制御力の効果的な使用を可能とし，振動応答の収束速度を向上させる．また，複数の制御目的が存在するとき，それらがトレードオフの関係にある場合がある．そのため，周波数応答の考察をもとに，本項目では制御目的に関しても時変とすることにより振動低減効率の向上を目指す．

### (3) 継続稼働

継続稼働については，エネルギー回生の考え方をを用いて，単位エネルギーあたりの最大応答の低減効果の向上を達成する．

アクティブ制御の省エネルギー化として，振動している建物や設備機器等のもつ運動エネルギーによりアクティブ動吸振器を駆動することを考える．振動系から得た回生電力を力行電力として利用するシステムは，モータの制御ではよく知られた制御手法であり，回生ブレーキとして電車等で用いられている．エネルギー回生の概要を Figure 1-3 に示す．機械システムの振動制御の分野では，例えば，須田ら<sup>[64], [65]</sup>の研究グループにより，振動からエネルギーを回生してアクティブ制御に利用するセルフパワード・アクティブ制御が提案されている．近年，米国でもこの分野の研究が盛んとなり Energy Harvesting Control と呼ばれている<sup>[66], [67], [68]</sup>．また，Ichchou et al.<sup>[69]</sup>は振動系における運動エネルギーをポテンシャルエネルギーに変換してアクティブ制御に利用し，このポテンシャルエネルギーが不足する場合にはセミアクティブ制御を行うグローバルセミアクティブ制御を提案している．

建築分野においては，通常のパッシブなダンパは振動エネルギーを吸収することによって振動を減衰させる．その際，吸収したエネルギーは摩擦などによって熱エネルギーに変換され，大気中に廃棄される．この廃棄されるエネルギーをエネルギー回生の考え方<sup>[64]</sup>に基づき積極的に利用するシステムを，建物の制振装置に適用した例が 2011 年に小池ら<sup>[70]</sup>によって報告されている．この報告では，制振装置に必要な電力を従来の 1/3 以下に低減

できており，エネルギー消費の低減の観点からエネルギーを回生することの有効性が示されている．また，電力回生コンバータを用いた電力回生機構付きアクティブマスダンパ (AMD) を実建物に適用し，制振効果と電力を観測した結果が 2012 年に曾根・山本<sup>[71]</sup>により報告されている．さらに，アクティブ制御のエネルギー問題に対応するために，制振装置のエネルギーネットワークを構成してエネルギーの再利用を行うシステム（例えばセミアクティブブレースでエネルギー変換を行い，そのエネルギーをアクティブ動吸振器の駆動に利用する電気系システム）の提案もなされている<sup>[72], [73]</sup>．

エネルギー回生を用いた制御において，より少ないエネルギーで効果的なアクティブ制御を達成する手段のひとつとして，エネルギーの消費量（エネルギーの回生量）を設計変数として扱うことのできるエネルギー最適制御理論<sup>[74]</sup>に基づく手法が挙げられる．エネルギーを評価関数に加えた制御については，他には例えば Park and Ok<sup>[75]</sup>によって評価関数を最大応答，最大制御力，最大瞬間電力，全体での使用エネルギーについて記述する方法が提案されている．ただし，本論ではエネルギーの回生を考慮した使用エネルギーを評価するために，電力の符号（力行電力と回生電力）を考慮することのできるエネルギー最適制御理論に着目し検討を行う．エネルギー最適制御による制御では評価関数の設定方法が複雑であり，建物系の振動制御に適用する際には設計指針が必要となる．エネルギー最適制御の評価関数は具体的には低減させたいパワーの項，最適レギュレータの制御量項に相当する項，アクチュエータが制御対象に加えるパワーの項から構成される．本章では低減させたいパワーとして散逸パワーを評価することにより，熱として消費されるエネルギーを有効に回生できることを示す．例としてエネルギー最適制御を免震床に適用する際の評価関数の構成要素やその重み係数の決定方法等に関する設計指針を示すとともに，制御性能とエネルギー消費量の関係を示す．また，エネルギー回生を陽に考慮することにより，単位エネルギーあたりの制御性能が向上することを示す．

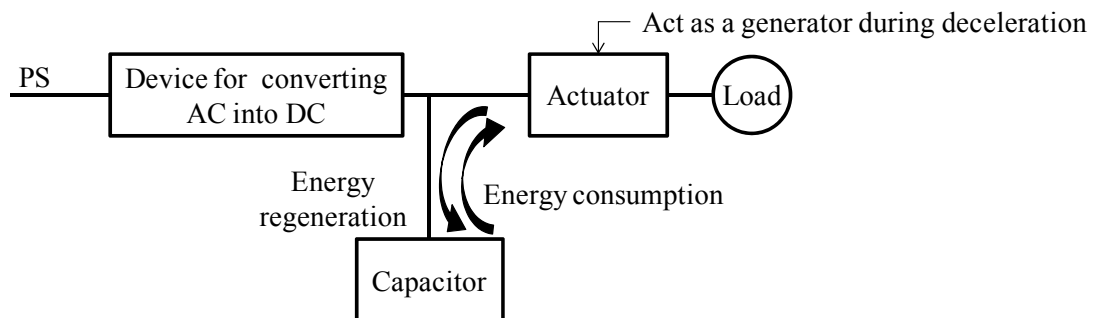


Figure 1-3 General idea of electric power regeneration for reuse<sup>[70]</sup>.

### 1.4. 本論文の構成

各章の関係をまとめたものを本章末尾の Figure 1-4 に示す .1 章では本論文全体の研究背景を述べた . 2 章以降の各章の概要は以下のとおりである .

### 第 2 章

2 章では建物の機能維持率を向上させることを目的とした , 最適レギュレータにおける無次元化評価関数について , 制御量項の各制御量間のバランスを取る方法を示す .

### 第 3 章

3 章では収束速度を向上させることを目的とした , 最適レギュレータに基づいた可変ゲインフィードバック制御における最大要求制御力の推定について示す . ここで , 評価関数内の制御量項については , 2 章で導入した機能維持率向上を目的とした無次元化評価関数の知見に基づき設計を行う .

### 第 4 章

4 章では単位エネルギーあたりの最大応答の低減効果を向上させることを目的とした , エネルギー最適制御の適用方法について示す . また , 消費エネルギーを最適レギュレータにおいて評価する方法について示し , エネルギー最適制御との比較を行う . ここで , 評価関数内の制御量 ( 制御目的 ) 項については , 2 章で導入した機能維持率向上を目的とした無次元化評価関数の知見に基づき設計を行う .

### 第 5 章

本研究により達成される振動制御の効果を建物機能継続の観点から結論付ける . また , 本研究が現時点で有する課題を整理し , 今後の展望を述べる .

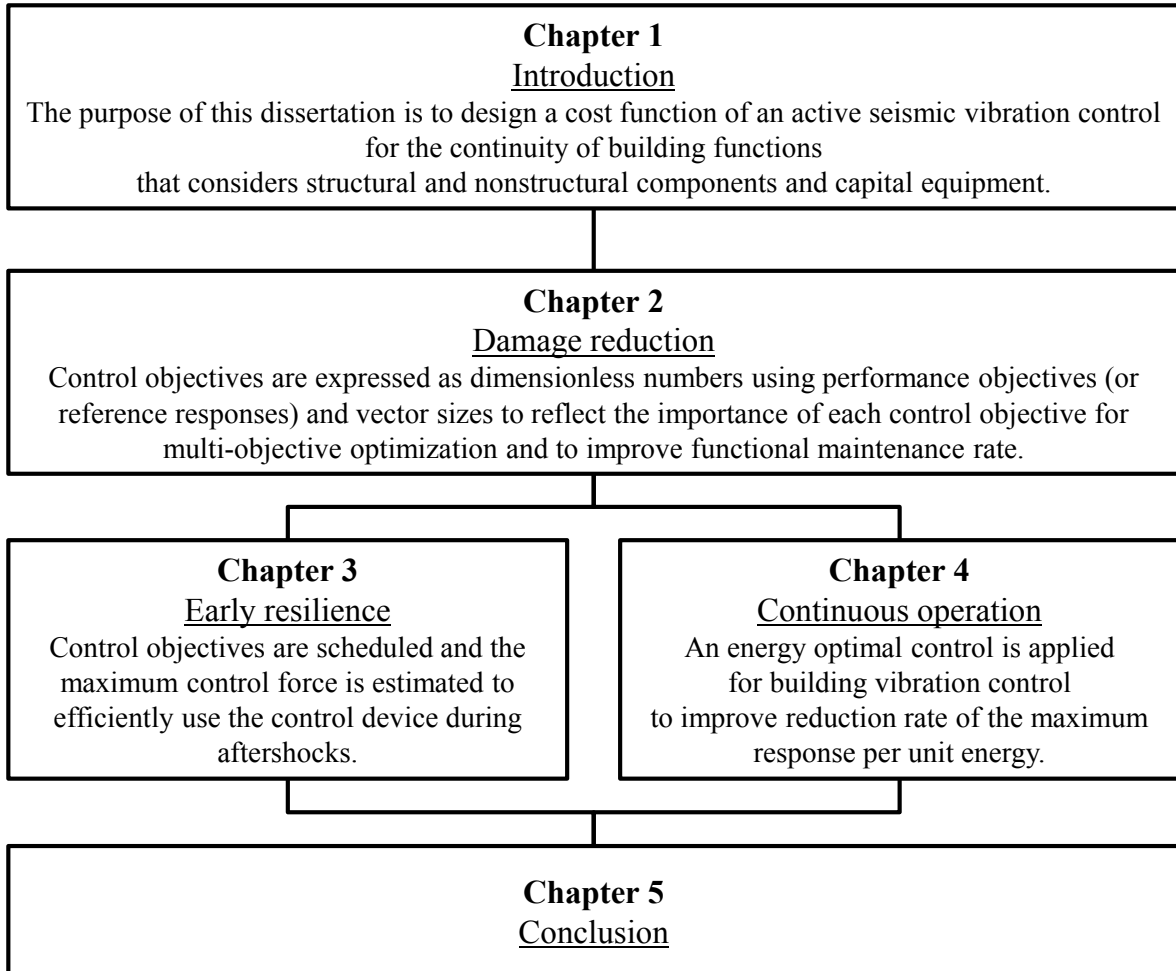


Figure 1-4 Overview of this dissertation.

## 第2章 被害低減に向けた無次元化評価関数に 基づく制御系設計

2.1. 緒言

本章では建物機能継続のための評価項目(1)被害低減を目的として、最適レギュレータ (LQR: Linear-Quadratic Regulator)の評価関数の制御量項の設計から建物の機能維持率の向上を達成する。最適レギュレータの評価関数は通常、状態ベクトル  $\mathbf{x}_{ss}$  および制御力ベクトル  $\mathbf{u}$  を用いて次のような 2 次形式で表される。

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}_{ss}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_{ss} + 2\mathbf{x}_{ss}^T \mathbf{S} \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (2-1)$$

ここで重み係数  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{S}$  は半正定条件,  $\mathbf{R}$  は正定条件のもと自由に設計することができる。式(2-1)の評価関数を最小とする最適制御入力は次式で与えられる。

$$\mathbf{u} = -\mathbf{F} \mathbf{x}_{ss} \quad (2-2)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{S}^T + \mathbf{B}^T \mathbf{P}) \quad (2-3)$$

ここで  $\mathbf{P}$  は以下の Riccati 方程式から一意に決定される。

$$\mathbf{P}(\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}^T) + (\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}^T)^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} - \mathbf{S} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}^T = \mathbf{0} \quad (2-4)$$

ここで  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  はシステムを状態空間表現した際の係数行列である。式(2-1)は他の表現として出力  $z_i$  を用いて式(2-5)のように表すことができる。

$$J = \int_0^{\infty} \left( \sum_{i=1}^{N_c} z_i^T z_i + \mathbf{u}^T \mathbf{R}' \mathbf{u} \right) dt \quad (2-5)$$

ここで  $z_i$  には低減させたい応答を設定し、この項を制御量項と呼ぶ。本章ではこの評価関数の  $N_c$  個の制御量項の構成方法について、各制御量間のバランスを取る方法を提案する。最適レギュレータの重み係数(式(2-1)の  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{R}$ )の設計方法については、極配置から重み係数を設計する方法<sup>例えば[43], [44], [76]</sup>や性能目標をもとにチューニングを行うもの等、多くの提案がなされている。ここでは建物やそれに付随する設備機器からなるシステムを対象として、その機能維持率の向上を目的とした制御を考える。その際、例えば建物の層間変形角を抑え構造的な被害の発生を防ぐことを考える場合、特定層の層間変形角のみを抑える制御の要求は考えにくい。そこで本章では複数存在する建物や設備機器に対する制御目的を見通し良く設計する方法として、建物の加速度や建物の層間変形角、設備機器の加速度、免震層の変位といった制御対象をそれぞれグループ化したベクトル  $\mathbf{z}_i (i = 1, 2, \dots, N_c)$  として考え、それらの応答を平均的に抑えようというコンセプトの設計方法を示す。その際、制御目的であるベクトル  $\mathbf{z}_i$  を無次元化することでそれぞれの最大値のオーダーを揃え、さらにベクトルの要素数で除し、各 2 次形式項の評価関数への寄与率を揃える操作を行う。ベクトルの要素数で除すことの効果の検証については 2.5 節で示す。

なお、建物構造が被害を受けうる強震時には、建物の振動制御が優先して行われるべきであり、このような事例に対しては、時変制御により制御を建物の振動抑制を重視したものに切り替える対応が考えられる。入力地震動の強さや建物の応答量に応じて制御を切り替える時変制御による制御目的が複数ある場合の制御についてはすでに著者らにより行われており<sup>[77]</sup>、詳細は第 3 章に示す。

## 2.2. 無次元化評価関数の提案

本章では最適レギュレータの評価関数を建物の機能維持の観点から設定する方法について述べる。

まず，建物や設備機器に求める性能目標  $\mathbf{p}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N_c$ ) (例えば，層間変形角や絶対加速度) を設定する．また，想定する地震動に対する非制御状態での振動解析を行い，性能目標を設定した物理量の最大応答を算出し，その結果をもとに，応答低減を重視する程度に応じて大きな係数で最大応答を除し参照最大応答  $\mathbf{r}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N_c$ ) を設定する．

次に，性能目標を設定した物理量  $z_i$  (制御目的，制御量) を係数行列  $\mathbf{C}_i, \mathbf{D}_i$  を用いて出力方程式の形で記述する．

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{D}_i \mathbf{u} \quad (i = 1, 2, \dots, N_c) \quad (2-6)$$

LQR の評価関数 (式(2-5)) においては，制御目的にとる複数の物理量について各項のオーダーが異なると，物理量それぞれに対する制御効果が大きく異なりうる．そこで，性能目標  $\mathbf{p}_i$  および参照最大応答  $\mathbf{r}_i$  に基づき，制御量  $z_i$  の成分  $z_{ij}$  に対し次の無次元化操作を行う．

$$\tilde{z}_{ij} = \frac{z_{ij}}{\min(p_{ij}, r_{ij})} \quad (i = 1, 2, \dots, N_c) \quad (2-7)$$

ここで， $\tilde{z}_{ij}, p_{ij}, r_{ij}$  はそれぞれベクトル  $\tilde{\mathbf{z}}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{r}_i$  の第  $j$  成分を表している．

続いて，制御力についても同様の無次元化操作を行う．

$$\tilde{u}_j = \frac{u_j}{u_{\max j}} \quad (2-8)$$

ここで  $u_j, \tilde{u}_j$  はそれぞれベクトル  $\mathbf{u}, \tilde{\mathbf{u}}$  の第  $j$  成分， $u_{\max j}$  は  $j$  番目の制振装置の最大出力である．

上記の無次元化量を用い，制御量項と制御力項のそれぞれを 2 次形式として評価関数を設定する．ここで，2 次形式の各項はベクトルの次元  $D$  で除し，各項の最大値のオーダーが揃うようにする．また，制御量項が複数存在する場合は，各制御量項を制御量項の個数  $N_c$  で除し，制御量と制御力のバランスを図る．ただし，振動制御においては，応答  $z_i$  については小さくすることを目的としているが，制御力  $\mathbf{u}$  については能力を十分に発揮するため，応答中は全時間において上限値近傍となることが望ましい．LQR の評価関数は制御量項と制御力項両者の和を最小とする制御ゲインを与える．そのため，例えば応答制御量が性能目標  $\mathbf{p}_i$  あるいは参照最大応答  $\mathbf{r}_i$  の 50 % に抑えられるとき，制御力も最大出力の 50 % となるような制御が行われることとなる．そこで補正係数  $\gamma$  を導入し，最適レギュレータの評価関数を次のように与える．

$$J = \int_0^{\infty} \left( \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{\tilde{\mathbf{z}}_i^T \tilde{\mathbf{z}}_i}{D(\tilde{\mathbf{z}}_i)} + \gamma \frac{\tilde{\mathbf{u}}^T \tilde{\mathbf{u}}}{D(\tilde{\mathbf{u}})} \right) dt \quad (2-9)$$

ここで，関数  $D(\mathbf{z})$  はベクトル  $\mathbf{z}$  の要素数を表す．

重み係数 (式(2-5)の  $\mathbf{R}'$ ) は通常，繰り返し計算により求められる．例えば，吉田ら<sup>[78]</sup>

は一定の飽和時間（60 秒の地震動に対して 10 秒間）となるような  $R$  の値を繰り返し計算から求めている．本研究において  $\gamma$  は，非制御時の制御対象の応答と制御装置の装置能力から以下のように設定するものとする．

$$\gamma = \left( 1 - \frac{u_{\max}}{m\bar{a}} \right) \beta \quad (2-10)$$

ここで  $m$  は制御対象の 1 自由度に相当する平均質量， $\bar{a}$  はその非制御時における加速度応答の最大値である．式(2-10)により，応答の大きさに対して制御力に余裕があるほど  $\gamma$  は小さな値となる．したがって，評価関数  $J$  (式(2-9)) における制御力に対するペナルティが弱くなり，大きな制御力が与えられるようになる．実装時にはこの値を基準とし，地震動の強さや建物の応答量に応じて制御を切り換える可変制御<sup>[77]</sup>を行う．簡単のため時不変制御としている本論では，式(2-10)中にパラメータ  $\beta$  を導入することにより，制御力重みに自由度を持たせる．なお  $\beta$  は既往研究<sup>[77]</sup>において地震動強さに応じて制御力重みを変更するパラメータ  $\beta$  に相当する役割を果たしている．

評価関数の設定方法について以下にまとめる．

- Step 1. 性能目標  $\mathbf{p}_i$  を設定する．
- Step 2. 想定する地震動に対する非制御状態での振動解析により，性能目標を設定した物理量の参照最大応答  $\mathbf{r}_i$  を算出する．
- Step 3. 非制御状態での振動解析の結果より補正係数  $\gamma$  を算出する．
- Step 4. 性能目標  $\mathbf{p}_i$  を設定した物理量である制御量  $\mathbf{z}_i$  を出力方程式の形で記述する．
- Step 5. 制御量  $\mathbf{z}_i$  の成分を，性能目標  $\mathbf{p}_i$  と参照最大応答  $\mathbf{r}_i$  のうち小さい方で除し，無次元化する．
- Step 6. 制御力  $\mathbf{u}$  の成分を制振装置の最大出力  $u_{\max_j}$  で除し，無次元化する．
- Step 7. 評価関数  $J$  内の制御量項を，無次元化した制御量  $\tilde{\mathbf{z}}_i$  の各成分の二乗和を  $\tilde{\mathbf{z}}_i$  の要素数で除したものと記述し，その項数  $N_c$  で和の各項を除す．また，評価関数  $J$  内の制御力項を，無次元化した制御力  $\tilde{\mathbf{u}}$  の成分の二乗和を  $\tilde{\mathbf{u}}$  の要素数で除したものと記述し，補正係数  $\gamma$  を乗ずる．

## 2.3. 検証解析

### 2.3.1. 制御系設計モデル

提案する無次元化評価関数が建物機能維持を目的とした制御に有効であることを，基礎部にアクティブ免震装置を有する病院建物のシミュレーション解析により検証する．解析対象は Figure 2-1 に示すような建物の  $j$  層に医療設備（CT スキャナーを想定）を設置した  $N$  層免震病院建物（免震周期  $T_i = 4.0$ ，上部構造の固有周期  $T_b = 1.2$ ）とする．解析モデルのパラメータを Table 2-1 に示す．免震層に制振装置（制御力  $u_b$ ）を設置した系の運動方程式は次のようになる．

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{x}_g + \mathbf{f}u_b \quad (2-11)$$



$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_i & & & \mathbf{O} \\ & m_{b1} & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{O} & & & m_{bN} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_i + c_{b1} & -c_{b1} & & & \mathbf{O} \\ -c_{b1} & c_{b1} + c_{b2} & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & \ddots & c_{b(N-1)} + c_{bN} & -c_{bN} \\ \mathbf{O} & & & -c_{bN} & c_{bN} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_i + k_{b1} & -k_{b1} & & & \mathbf{O} \\ -k_{b1} & k_{b1} + k_{b2} & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & \ddots & k_{b(N-1)} + k_{bN} & -k_{bN} \\ \mathbf{O} & & & -k_{bN} & k_{bN} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

$$\mathbf{x} = \{x_i \quad x_{b1} \quad \cdots \quad x_{bN}\}^T \quad (2-15)$$

$$\mathbf{f} = \{1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0\}^T \quad (2-16)$$

ここで  $\mathbf{1} = \{1 \quad \cdots \quad 1\}^T \in R^{N+1}$  である．また， $x_{b_n}, x_i$  はそれぞれ建物  $n$  層および免震層の建物基礎部に対する相対変位， $x_g$  は建物基礎部の絶対変位， $m_{b_n}, m_i$  はそれぞれ建物  $n$  層および免震層の質量である．建物  $n$  層の層剛性  $k_{b_n}$  の分布は，建築基準法で規定される  $A_i$  分布によって定まる静的な地震力を評価し，この地震力によって直線的に変形するような剛性分布を求め，固有周期  $T_b$  に合致するように，各層の剛性の比率を一定に保ったまま剛性分布を調整することにより与え，線形弾性を仮定する．なお，本章では入力にはレベル 2 の告示波 100 波を用いる．これらの地震動は非制御時の建物応答で最大層間変形角が  $1/200$  rad を超過しないことから，線形弾性応答の仮定に問題がないことを確認している． $k_{b_n}$  の値を Table 2-2 に示す．また，建物上部構造の減衰は剛性比例型とし，建物  $n$  層の減衰係数  $c_{b_n}$  は建物上部構造の 1 次固有周期  $T_b$  と減衰定数  $\zeta_b$  を用いて式(2-17)で与える．なお，免震層の剛性  $k_i$  は式(2-18)で決定する．

$$c_{b_n} = \frac{\zeta_b T_b}{\pi} k_{b_n} \quad (2-17)$$

$$k_i = \left( \frac{2\pi}{T_i} \right)^2 \left( m_i + \sum_{n=1}^N m_{b_n} \right) \quad (2-18)$$

付録 A.1 に示すように免震層の復元力特性は，減衰についての履歴型ダンパや粘性型ダンパの仮定に応じて非線形モデル，線形モデルが提案されている．本章の制御系設計モデルの免震層は Figure A-1 に示す積層ゴムと速度比例型の粘性型ダンパから構成される線形モデルとして扱う．

免震層の非線形性に対応した制御系設計として，非常制御やゲインスケジューリング

[79], [80], [81]によるアプローチが考えられる．このうちゲインスケジューリングは，非線形系や時変系の制御を行う際によく用いられる方法である．ゲインスケジューリングにおいてロバスト性を持続する条件は時間変動が十分に遅い場合であること<sup>[82]</sup>，また，ゲインスケジューリングを高速に変動する系に適用する際の問題点とその対応アルゴリズムおよび非線形系への適用例が示されている<sup>[83]</sup>．本章で対象とするシステムにおいては，免震層の非線形性に由来するパラメータの時間変動は，免震層が固有周期  $T_i = 4.0$  で振動すると考えると，制御周期（本解析においては  $0.005$  s）に対して十分に遅いと考え，ゲインスケジューリングによる対応が可能であると考えられる．

系の固有周期と減衰定数を Table 2-3 に示す．

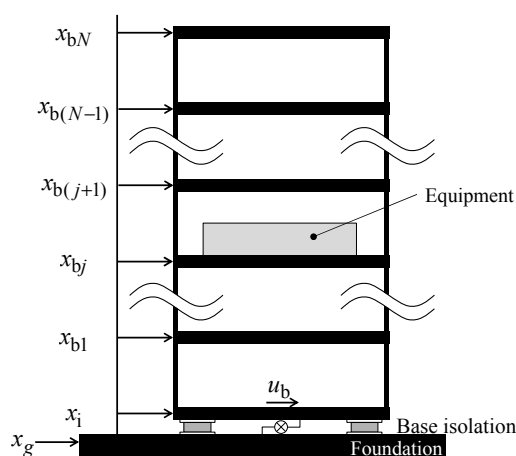


Figure 2-1 Analysis model.

Table 2-1 Physical parameters.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Layer height	$h$	4	m
Number of layers of the building	$N$	10	–
Fundamental period of the isolation layer	$T_i$	4.0	s
Fundamental period of the building	$T_b$	1.2	s
Damping factor of the building	$\zeta_b$	0.02	–
Damping coefficient of the isolation layer	$c_i$	$4.3 \times 10^6$	N·s/m
Mass of the $n$ -th layer of the building	$m_{bn}$	$1 \times 10^6$	kg
Mass of the isolation layer	$m_i$	$1 \times 10^6$	kg
Position of the equipment	$j$	4	–
Capacity of control force	$u_{b\max}$	$1 \times 10^6$	N

Table 2-2 Stiffness coefficient of building.

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$[10^8 \text{ N/m}]$	14.75	14.34	13.76	12.99	12.04	10.89	9.53	7.95	6.08	3.83

Table 2-3 Natural periods and damping factors.

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Natural period [s]	4.13	0.68	0.37	0.25	0.20	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09
Natural frequency [Hz]	0.24	1.47	2.72	3.93	5.09	6.20	7.28	8.33	9.37	10.40	11.44
Damping factor	0.11	0.06	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28

### 2.3.2. 無次元化評価関数

2.2 節で示した無次元化評価関数の設定方法に従い，評価関数を設定する．

Step 1.

まず，建物や設備機器に求める性能目標を設定する．本章では当該建物の敷地において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さをもつ地震動（以降，レベル 2 の地震動）に対して，Table 2-4 に示す値を性能目標に設定する．なお，これらの数値は以下のように設定している．

#### 建物

- ・層間変形角応答(Interstory drift)：免震建築物の技術基準<sup>[84]</sup>では上部構造の各階の層間変形角が 1/300 rad 以下であることとしている．
- ・免震層変位(Isolation layer drift)：建物免震層の水平クリアランス<sup>[85]</sup>より設定．

#### 設備機器

- ・絶対加速度応答(Absolute acceleration)：サーバラック機器について通常業務可能とされる数値<sup>[86]</sup>を参考に設定．

Step 2.

次に，想定する地震動に対する非制御の振動解析を行い，Table 2-4 に示した物理量の参照最大応答を算出する．レベル 2 の模擬地震動，ここでは平成 12 年建設省告示第 1461 号の極めて稀に起こる地震動の加速度応答スペクトルをもつ地震動（以下，告示波と呼ぶ）10 波に対する最大応答の平均と設定した参照最大応答を Table 2-5 に示す．

Step 3.

式(2-10)より

$$\gamma = \left\{ 1 - \frac{u_{b\max}}{\left( \sum_{n=1}^N m_{bn} \max_t |\ddot{x}_{bn}(t)| \right) / N} \right\} \beta = 0.158\beta \quad (2-19)$$

Step 4.

ここでは，性能目標を設定した物理量（制御量）を出力方程式の形で記述する．建物の層間変形角  $z_{bd}$  および免震層の相対変位  $z_{id}$  は状態ベクトル  $\mathbf{x}_{ss} = \{\mathbf{x}^T \quad \dot{\mathbf{x}}^T\}^T$  を用いて次のよ

うに表される .

$$\mathbf{z}_{bd} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} -1 & 1 & & \mathbf{O} \\ & \ddots & \ddots & \\ \mathbf{O} & & -1 & 1 \\ & & & \mathbf{O}_{N \times (N+1)} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{ss} \quad (2-20)$$

$$z_{id} = \{1 \quad \mathbf{0}_{1 \times (2N+1)}\} \mathbf{x}_{ss} \quad (2-21)$$

また , 系全体の絶対加速度は次式で表される .

$$\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{1}\ddot{x}_g = [-\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} \quad -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}] \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{f}u_b \quad (2-22)$$

したがって , 設備 ( 設備設置階 ) の絶対加速度  $z_{ea}$  は式(2-23)となる .

$$\begin{aligned} z_{ea} &= \{ \mathbf{0}_{1 \times j} \quad 1 \quad \mathbf{0}_{1 \times (N-j)} \} \{ \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{1}\ddot{x}_g \} \\ &= \{ \mathbf{0}_{1 \times j} \quad 1 \quad \mathbf{0}_{1 \times (N-j)} \} [-\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} \quad -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}] \mathbf{x}_{ss} + \{ \mathbf{0}_{1 \times j} \quad 1 \quad \mathbf{0}_{1 \times (N-j)} \} \mathbf{M}^{-1}\mathbf{f}u_b \end{aligned} \quad (2-23)$$

Step 5.

Table 2-4 の性能目標および Table 2-5 の参照最大応答に基づき , 制御量に対し以下の無次元化操作を行う .

$$\tilde{z}_{bd} = \frac{z_{bd}}{\min(p_{bd}, r_{bd})} \quad (2-24)$$

$$\tilde{z}_{id} = \frac{z_{id}}{\min(p_{id}, r_{id})} \quad (2-25)$$

$$\tilde{z}_{ea} = \frac{z_{ea}}{\min(p_{ea}, r_{ea})} \quad (2-26)$$

ここで , 建物応答  $z_{bd}$  については , 層剛性  $k_{bn}$  の分布を  $A_i$  分布により与えており , 変形が各層でおおよそ等しく生じると考え , 本章では 1 層から  $N$  層まで同じ重み  $p_{bd}, r_{bd}$  を与えるものとする . Table 2-4, Table 2-5 の値から , ここでは次のようになる .

$$\tilde{z}_{bd} = \frac{z_{bd}}{r_{bd}} \quad (2-27)$$

$$\tilde{z}_{id} = \frac{z_{id}}{r_{id}} \quad (2-28)$$

$$\tilde{z}_{ea} = \frac{z_{ea}}{r_{ea}} \quad (2-29)$$

Step 6.

続いて , 制御力の無次元化を行う .

$$\tilde{u}_b = \frac{u_b}{u_{b\max}} \quad (2-30)$$

Step 7.

制御量項と制御力項のそれぞれを 2 次形式とし , 次のように最適レギュレータの評価関数を設定する .

- 建物と設備の応答低減を目的とした制御（以下，建物-設備制御(Building & equipment control)）の評価関数

$$J_{be} = \int_0^{\infty} \left\{ \frac{1}{3} \left( \frac{\tilde{\mathbf{z}}_{bd}^T \tilde{\mathbf{z}}_{bd}}{D(\tilde{\mathbf{z}}_{bd})} + \tilde{z}_{id}^2 + \tilde{z}_{ea}^2 \right) + \gamma \tilde{u}_b^2 \right\} dt \quad (2-31)$$

- 建物の応答低減のみを目的とした制御（以下，建物制御(Building control)）の評価関数

$$J_b = \int_0^{\infty} \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{\tilde{\mathbf{z}}_{bd}^T \tilde{\mathbf{z}}_{bd}}{D(\tilde{\mathbf{z}}_{bd})} + \tilde{z}_{id}^2 \right) + \gamma \tilde{u}_b^2 \right\} dt \quad (2-32)$$

なお，式(2-19)について時刻歴応答解析の結果から，ここでは建物-設備制御では  $\beta = 12.0$ ，建物制御では  $\beta = 0.316$  とした．

ここでは制御力について 1 入力の解析対象を設定し立式を行ったが 2 入力以上のとき<sup>[87]</sup>についても同様に無次元化評価関数の立式を行うものとする．

## 2.4. 解析結果と考察

### 2.4.1. 解析概要

建物-設備制御，建物制御および非制御状態について時刻歴応答解析を行った．本章では入力にはレベル 2 の告示波 100 波を用いた．告示波は解放工学的基盤におけるものとし，位相スペクトルはランダムとした．本章で想定する入力を用いる場合，検証解析モデルは 2.3.1 項に示した制御系設計モデルにおける仮定が成り立つものとして，線形モデルを用いて検証解析を行った．免震層に非線形性を含むモデルに対する検証解析結果については付録 A.1 に示した．

また，装置能力の限界を考慮し，解析において制御入力  $u'_b$  を式(2-2)により計算される制御力  $u_b$  から以下のように与えた．

$$u'_b = \begin{cases} u_b & |u_b| \leq u_{b\max} \\ u_{b\max} \operatorname{sgn}(u_b) & |u_b| > u_{b\max} \end{cases} \quad (2-33)$$

Table 2-5 に示した参照最大応答に対する最大応答の比  $R_r$  を Table 2-6 に，Table 2-4 に示した性能目標に対する最大応答の比  $R_p$  を Table 2-7 に示す．ここで，建物の応答については次式のように建物全層の中の最大応答値について比の算出を行っている．

$$R_r = \frac{1}{r} \max_k \left( \max_t |z_k(t)| \right) \quad (2-34)$$

$$R_p = \frac{1}{p} \max_k \left( \max_t |z_k(t)| \right) \quad (2-35)$$

また，参照最大応答に対する二乗平均平方根(RMS: Root Mean Square)の値  $R_{\text{RMS}}$  の比較を Table 2-8 に示す．

$$R_{\text{RMS}} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{1}{NT} \sum_{k=1}^N \int_0^T z_k^2(t) dt} \quad (2-36)$$

ただし、本解析において入力地震動の継続時間  $T=60$  としている。また、告示波 100 波中の平均的な応答を示した 1 波に対する各制御手法での時刻歴応答を Figure 2-2, Figure 2-3 に示す。ここで Figure 2-2 および Figure 2-3 の(a)最大層間変形角と(b)最大絶対加速度については、各時刻における建物の全層における絶対値の最大値を示している。

#### 2.4.2. 制御特性

設備の最大絶対加速度応答の低減については、Table 2-6～Table 2-8 より、建物-設備制御で建物制御よりも応答低減率が大きいことが確認できる。一方、建物の層間変形角応答と免震層の変位応答では、建物-設備制御で建物制御よりも応答低減率が小さい。Figure 2-2, Figure 2-3 の時刻歴応答を比較すると、(b)建物の最大絶対加速度で建物制御が建物-設備制御に比べて応答が小さいことが確認できる。建物の絶対加速度応答は非制御時に最大応答（告示波 100 波平均）で  $1.24 \text{ m/s}^2$  であり、建物制御でその 1.00 倍、建物-設備制御で 1.13 倍となった。一方、(d)設備の絶対加速度を比較することにより建物-設備制御では、建物（設備設置階以外）の絶対加速度応答の増大を伴って、設備の絶対加速度応答を低減していることが確認できる。ただし、建物-設備制御において建物の絶対加速度応答は建物内の人が行動（たとえば避難行動）をとれる絶対加速度<sup>[88]</sup>から考えると十分余裕があるので、建物制御に比べて応答は増大しているが許容される。

本章で設定した制御量については以下のことがいえる。

Table 2-4 に示した各応答の性能目標の要求水準は同等ではない。

物理量は独立に制御できない。

については、Table 2-7 の非制御時の各項目の比較から説明できる。もし、全ての性能目標が同程度の達成難度であるならば、非制御時において各項目の値は同程度となる。しかし、Table 2-7 ではそのようになっていない。

については、Figure 2-2 (b), Figure 2-3 (b)より、設備の最大絶対加速度応答を抑えるために建物の絶対加速度応答の増大が生じていることから分かる。このことについて、2 つの制御における周波数応答を Figure 2-4～Figure 2-7 に示す。Figure 2-4, Figure 2-5 では非制御時の周波数応答は 1 層と 10 層のみを示している。設備の絶対加速度応答については、Figure 2-6 より、建物-設備制御は建物制御と比較して、応答が小さい。また、免震層の変位応答については Figure 2-7 より、9 Hz 以下の帯域で僅かに建物-設備制御の応答が大きい。一方、Figure 2-4 に示す建物-設備制御は建物の周波数応答においては、Figure 2-5 に示す建物制御での周波数応答に比べ 1～2 次の振動モード（Table 2-3 参照）の帯域（0.2～1.5 Hz）で絶対加速度応答に微小な増加が見られる。

したがって今後、評価関数の改良として、制御対象の振動特性や、建物の敷地で想定される地震動の特性を考慮し、性能目標を周波数領域で設定<sup>[89]</sup>することが考えられる。また、制御力に関する重み係数  $\gamma$  は地震動の強さの変化に応じて変更されることが望ましい。より効果的な制御を行うためには補正係数  $\gamma$  の設計において本章で用いた値を初期値としてゲインスケジューリングを行う対応<sup>[77]</sup>が考えられる。

第 2 章

Table 2-4 Performance objectives.

	Response	Symbol	Performance objective
Building	Interstory drift	$p_{bd}$	1/300 rad
	Isolation layer drift	$p_{id}$	0.5 m
Equipment	Absolute acceleration	$p_{ea}$	1.0 m/s <sup>2</sup>

Table 2-5 Uncontrolled maximum responses and reference maximum responses.

	Response	Average value of uncontrolled maximum responses	Symbol	Reference maximum response
Building	Interstory drift	0.00156 rad	$r_{bd}$	0.00156 rad
	Isolation layer drift	0.348 m	$r_{id}$	0.348 m
Equipment	Absolute acceleration	1.05 m/s <sup>2</sup>	$r_{ea}$	0.105 m/s <sup>2</sup>

Table 2-6 Ratio of maximum response to reference maximum response.

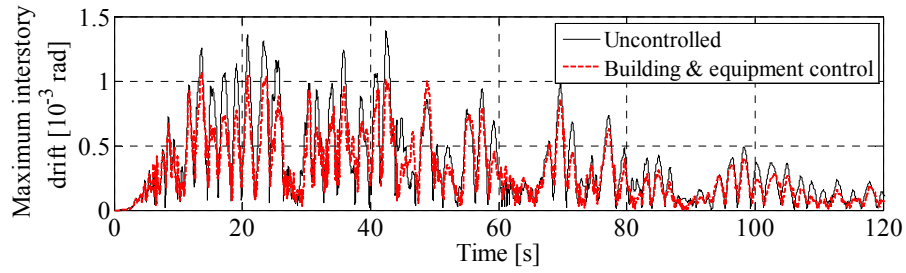
	Building		Equipment
	Interstory drift	Isolation layer drift	Absolute acceleration
Uncontrolled	1.02	1.02	10.2
Building & equipment control	0.857	0.857	8.92
Building control	0.806	0.774	9.40

Table 2-7 Ratio of maximum response to performance objective.

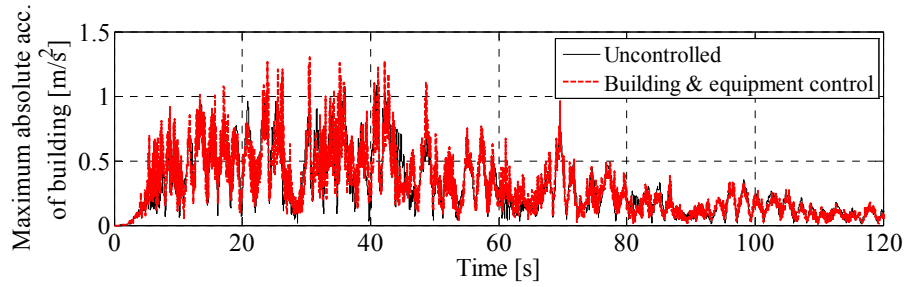
	Building		Equipment
	Interstory drift	Isolation layer drift	Absolute acceleration
Uncontrolled	0.475	0.712	1.07
Building & equipment control	0.401	0.597	0.937
Building control	0.377	0.539	0.987

Table 2-8 Ratio of RMS value to reference maximum response.

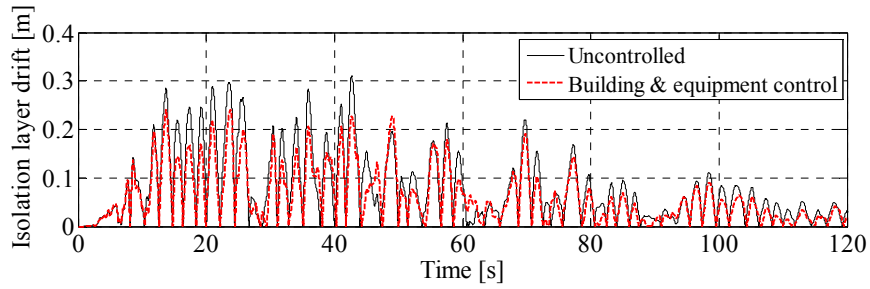
	Building		Equipment
	Interstory drift	Isolation layer drift	Absolute acceleration
Uncontrolled	0.281	0.373	3.27
Building & equipment control	0.236	0.304	2.70
Building control	0.231	0.268	3.02



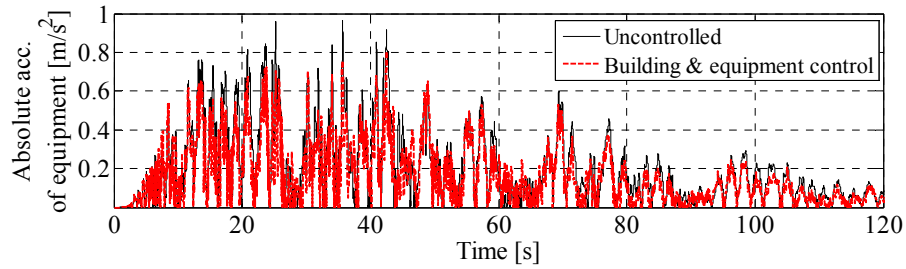
(a) Maximum interstory drift of building.



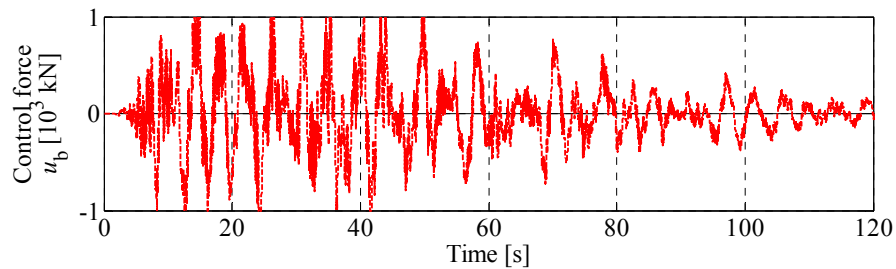
(b) Maximum absolute acceleration of building.



(c) Isolation layer drift.



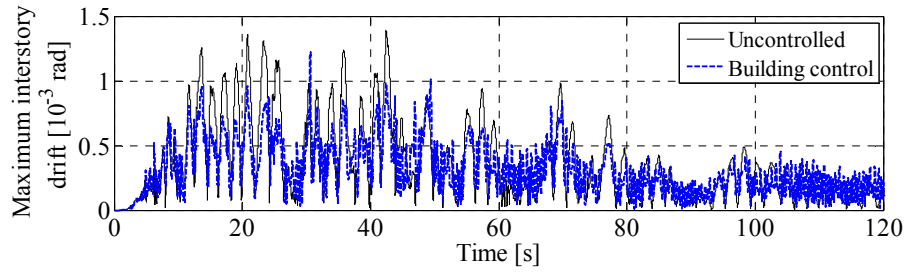
(d) Absolute acceleration of equipment.



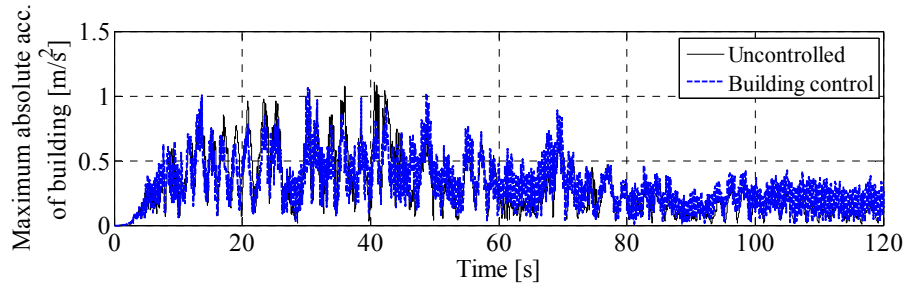
(e) Control force.

Figure 2-2 Time history responses and control force controlled by building & equipment control.

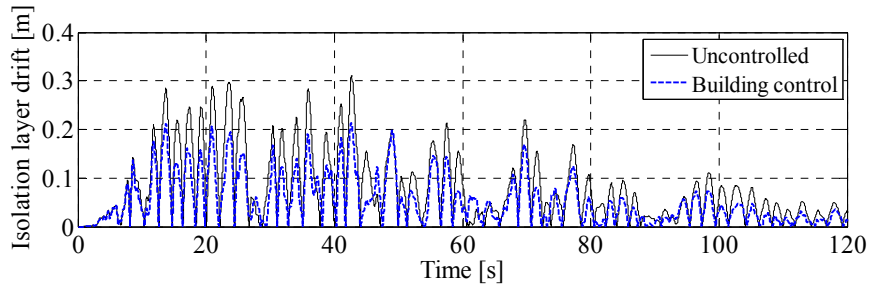




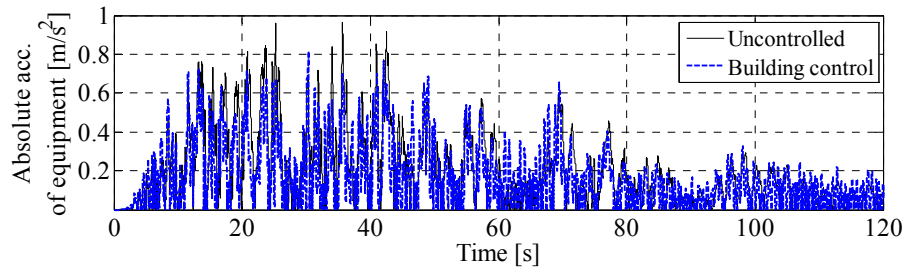
(a) Maximum interstory drift of building.



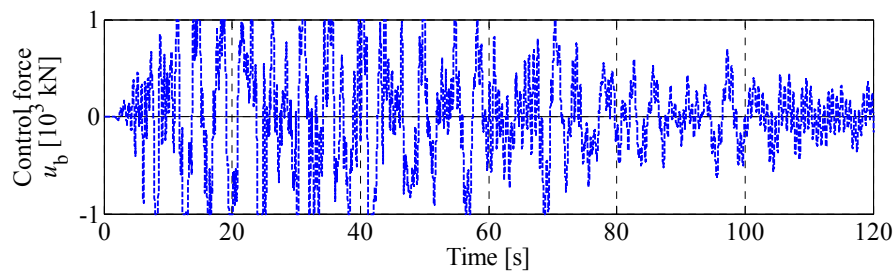
(b) Maximum absolute acceleration of building.



(c) Isolation layer drift.



(d) Absolute acceleration of equipment.



(e) Control force.

Figure 2-3 Time history responses and control force controlled by building control.

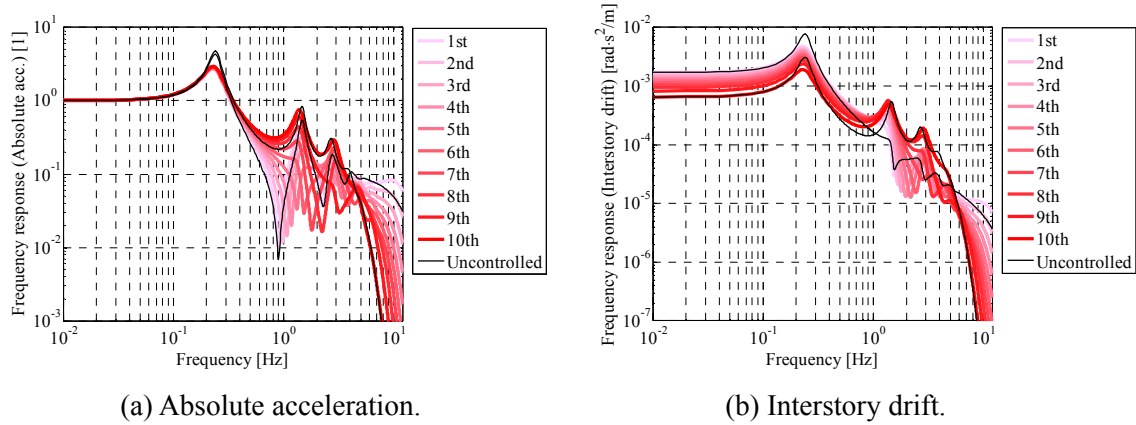


Figure 2-4 Frequency responses of building controlled by building & equipment control.

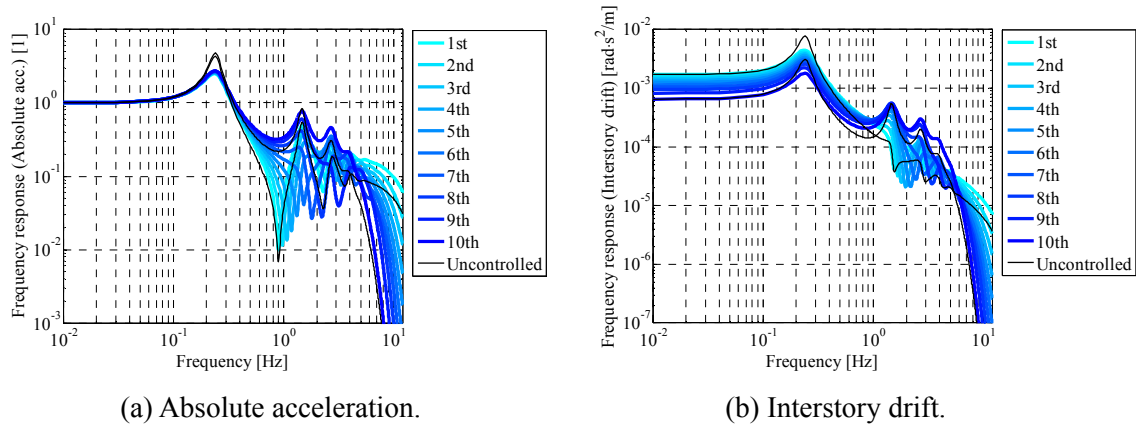


Figure 2-5 Frequency responses of building controlled by building control.

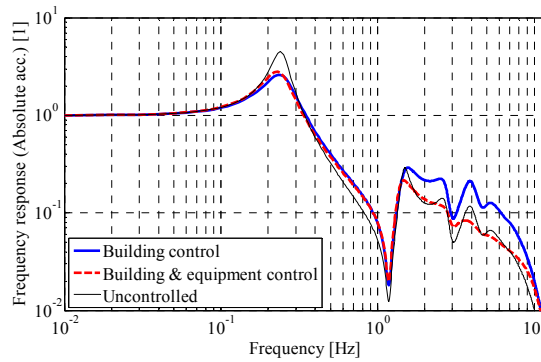


Figure 2-6 Frequency responses of equipment absolute acceleration.

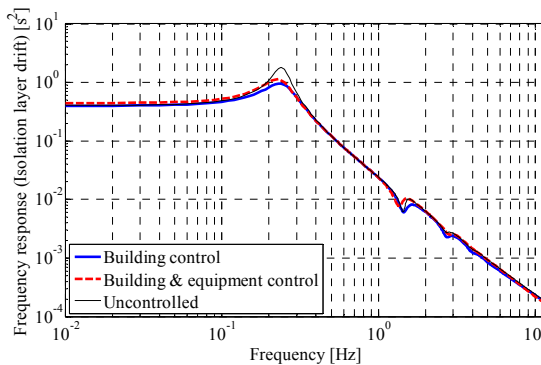


Figure 2-7 Frequency responses of isolation layer drift.

Table 2-9 Ratio of maximum response to reference maximum response.

	Building		Equipment
	Interstory drift	Isolation layer drift	Absolute acceleration
Uncontrolled	1.02	1.02	10.2
Building & equipment control (with $D(\mathbf{z})$ )	0.857	0.857	8.92
Building & equip. control (without $D(\mathbf{z})$ )	0.850	0.843	9.32
Building control	0.806	0.774	9.40

## 2.5. 無次元化における $D(\mathbf{z})$ の効果の検証

### 2.5.1. 2.3.1 項の解析対象による検証

ここでは無次元化評価関数の設計の Step 7.における要素数  $D(\mathbf{z})$  の効果の検証のために、建物-設備制御において  $D(\mathbf{z})$  を用いた場合と用いない場合について比較を行う。建物-設備制御で要素数  $D(\mathbf{z})$  による基準化を行わない場合の評価関数は次式で表される。

$$J_{be} = \int_0^{\infty} \left\{ \frac{1}{3} (\tilde{\mathbf{z}}_{bd}^T \tilde{\mathbf{z}}_{bd} + \tilde{z}_{id}^2 + \tilde{z}_{ea}^2) + \gamma \tilde{u}_b^2 \right\} dt \quad (2-37)$$

$D(\mathbf{z})$  による基準化を行わない場合の結果を Table 2-6 に加えた表を Table 2-9 に示す。 $D(\mathbf{z})$  を用いない場合、 $D(\mathbf{z})$  を用いた場合と比較して設備の絶対加速度応答の性能がやや劣るが、この結果から両者の差は見えにくい。これは建物の床応答を設備の応答としているため、建物の振動制御と設備の振動制御がほぼ同目的となっているためと考えられる。そこで、2.5.2 項において、別のモデルを対象とした同様の検証を行い、その効果を示す。

### 2.5.2. 別解析対象による検証

ここでは Figure 2-8 に示す、設備（免震床）を建物とは別の自由度として設定した解析対象について検証を行う。なお、免震建物に免震床を導入する想定は困難なことから、ここでは建物の最上層に制御力を入力するモデルとする。運動方程式は次のように表せる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{x}_g + \mathbf{f}u \quad (2-38)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{b1} & & & \mathbf{0} \\ & \ddots & & \\ & & m_{bN} & \\ \mathbf{0} & & & m_c \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{b1} + c_{b2} & -c_{b2} & & & & & & 0 \\ -c_{b2} & \ddots & \ddots & & & & & \vdots \\ & \ddots & \ddots & & & & & 0 \\ & & \ddots & c_{bj} + c_{b(j+1)} + c_e & \ddots & & & -c_e \\ & & & \ddots & \ddots & & & 0 \\ & & & & \ddots & & & \vdots \\ & & & & & & -c_{bN} & \vdots \\ & & & & & & -c_{bN} & c_{bN} \\ 0 & \cdots & 0 & -c_e & 0 & \cdots & 0 & c_e \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{b1} + k_{b2} & -k_{b2} & & & & & & 0 \\ -k_{b2} & \ddots & \ddots & & & & & \vdots \\ & \ddots & \ddots & & & & & 0 \\ & & \ddots & k_{bj} + k_{b(j+1)} + k_e & \ddots & & & -k_e \\ & & & \ddots & \ddots & & & 0 \\ & & & & \ddots & & & \vdots \\ & & & & & & -k_{bN} & \vdots \\ & & & & & & -k_{bN} & k_{bN} \\ 0 & \cdots & 0 & -k_e & 0 & \cdots & 0 & k_e \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

$$\mathbf{x} = \{x_{b1} \quad \cdots \quad x_{bN} \quad x_e\}^T \quad (2-42)$$

$$\mathbf{f} = \{0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1 \quad 0\}^T \quad (2-43)$$

ここで  $x_{bn}$ ,  $x_e$  はそれぞれ建物  $n$  層および免震床の建物基礎部に対する相対変位,  $x_g$  は建物基礎部の絶対変位である. 建物  $n$  層の層剛性  $k_{bn}$  の分布は  $A_i$  分布により与え, 線形弾性を仮定する. なお,  $k_{bn}$  の値は Table 2-2 と同じとなる. また, 建物の減衰は剛性比例型とし, 建物  $n$  層と免震床の減衰係数  $c_{bn}$ ,  $c_e$  はそれぞれ建物と免震床の 1 次固有周期  $T_{b1}$ ,  $T_{e1}$  と減衰定数  $\zeta_b$ ,  $\zeta_e$  を用いて次式で与える. なお, 免震床の水平剛性  $k_e$  は式(2-46)で決定する.

$$c_{bn} = \frac{\zeta_b T_{b1}}{\pi} k_{bn} \quad (2-44)$$

$$c_e = \frac{\zeta_e T_{e1}}{\pi} k_e \quad (2-45)$$

$$k_e = \left( \frac{2\pi}{T_{e1}} \right)^2 m_e \quad (2-46)$$

解析対象のパラメータを Table 2-10 に, 固有値およびモード減衰定数を Table 2-11 に示す.

ここでは制御目的に次の 4 項目を設定する.

- 建物の層間変形角  $z_{bd}$
- 建物の絶対加速度  $z_{ba}$
- 免震床の相対変位  $z_{ed}$
- 免震床の絶対加速度  $z_{ea}$

いま, 建物-設備制御の評価関数として式(2-31)と同様に式(2-47)を, また, 無次元化評価関

数の設計の Step 7.における要素数  $D(z)$  による除算を行わない場合の式(2-48)の 2 種類を設定し比較検討を行う。

$$J_{bc} = \int_0^\infty \left\{ \frac{1}{4} \left( \frac{\tilde{\mathbf{z}}_{bd}^T \tilde{\mathbf{z}}_{bd}}{D(\tilde{\mathbf{z}}_{bd})} + \frac{\tilde{\mathbf{z}}_{ba}^T \tilde{\mathbf{z}}_{ba}}{D(\tilde{\mathbf{z}}_{ba})} + \tilde{z}_{ed}^2 + \tilde{z}_{ea}^2 \right) + \gamma \tilde{u}^2 \right\} dt \quad (2-47)$$

$$J_{bc} = \int_0^\infty \left\{ \frac{1}{4} \left( \tilde{\mathbf{z}}_{bd}^T \tilde{\mathbf{z}}_{bd} + \tilde{\mathbf{z}}_{ba}^T \tilde{\mathbf{z}}_{ba} + \tilde{z}_{ed}^2 + \tilde{z}_{ea}^2 \right) + \gamma \tilde{u}^2 \right\} dt \quad (2-48)$$

なお、無次元化には Table 2-12 に示す非制御時の最大応答を用いた。また  $\gamma$  は式(2-47), (2-48) 共通で 0.0045 とした。それぞれの場合について、周波数応答を Figure 2-9 ~ Figure 2-12 に示す。Figure 2-10 と Figure 2-12 に示す免震床の周波数応答の比較より、免震床の応答低減に  $D(z)$  が有効に機能していることが確認できる。

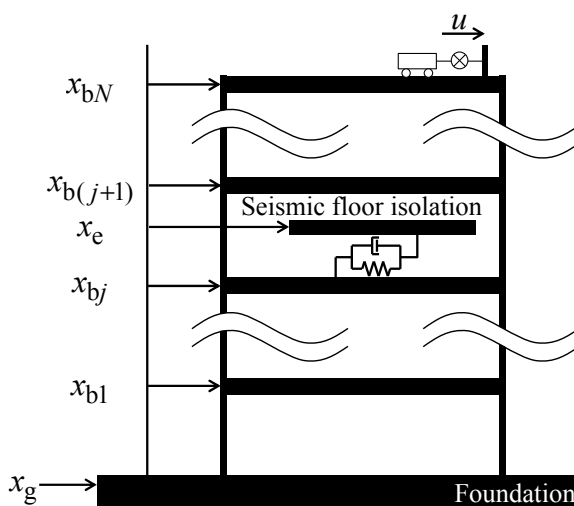


Figure 2-8 Analysis model.

Table 2-10 Physical parameters.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Layer height	$h$	4	m
Number of layers of the building	$N$	10	–
Fundamental period of the building	$T_{b1}$	1.2	s
Fundamental period of the isolation layer	$T_{e1}$	3	s
Damping factor of the building	$\zeta_b$	0.02	–
Damping factor of the isolation layer	$\zeta_e$	0.20	–
Mass of the $n$ -th layer of the building	$m_{bn}$	$1 \times 10^6$	kg
Mass of the isolation layer and the equipment	$m_e$	$1.5 \times 10^3$	kg
Position of the equipment	$j$	4	–

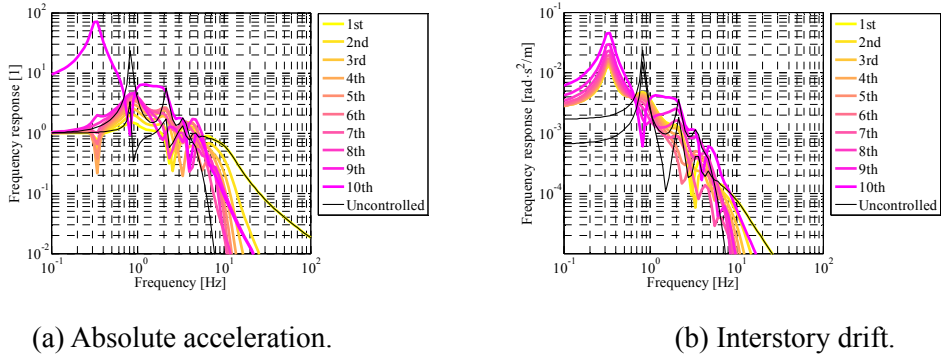


Figure 2-9 Frequency responses of building (with  $D(\mathbf{z})$ ).

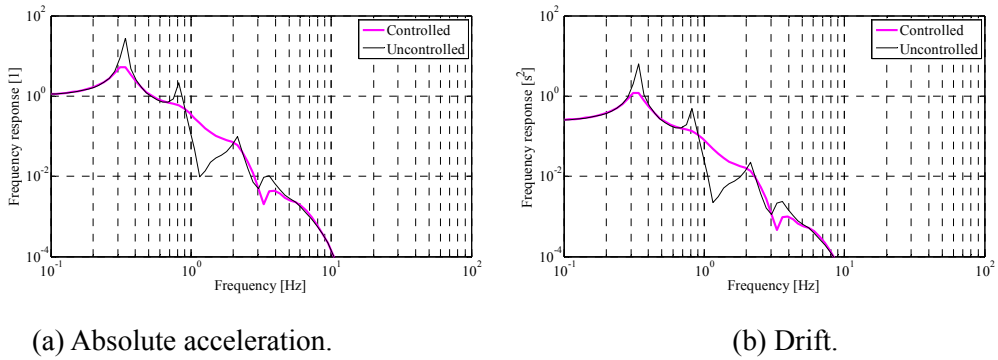


Figure 2-10 Frequency responses of isolation layer (with  $D(\mathbf{z})$ ).

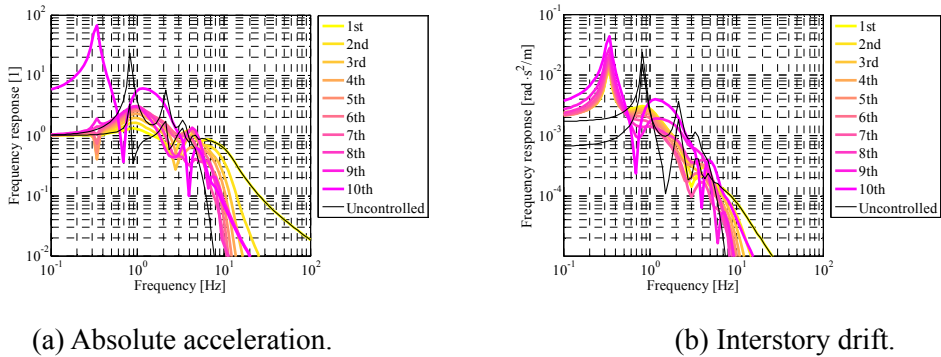


Figure 2-11 Frequency responses of building (without  $D(\mathbf{z})$ ).

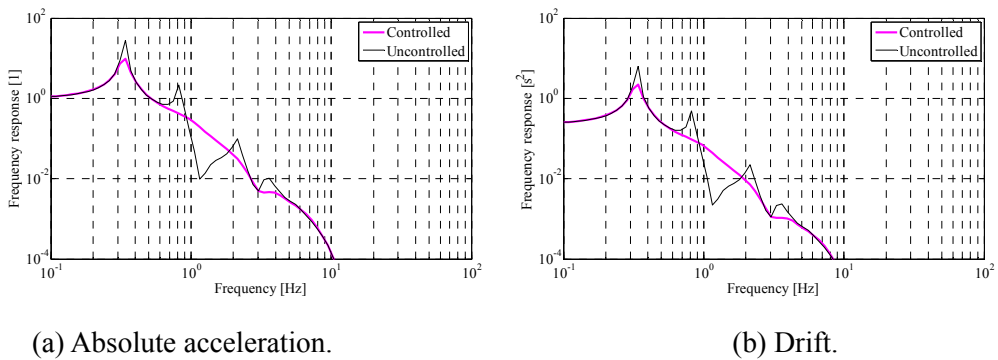


Figure 2-12 Frequency responses of isolation layer (without  $D(\mathbf{z})$ ).

第 2 章

Table 2-11 Natural periods and damping factors.

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Natural period [s]	3.00	1.20	0.47	0.29	0.21	0.17	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09
Natural frequency [Hz]	0.33	0.83	2.15	3.43	4.65	5.82	6.94	8.04	9.12	10.20	11.30
Damping factor	0.20	0.02	0.05	0.08	0.11	0.14	0.17	0.19	0.22	0.24	0.27

Table 2-12 Uncontrolled maximum responses.

	Response	Average value of uncontrolled maximum responses
Building	Interstory drift	0.00177 rad
	Absolute acceleration	2.23 m/s <sup>2</sup>
Equipment	Isolation layer drift	0.0627 m
	Absolute acceleration	0.337 m/s <sup>2</sup>

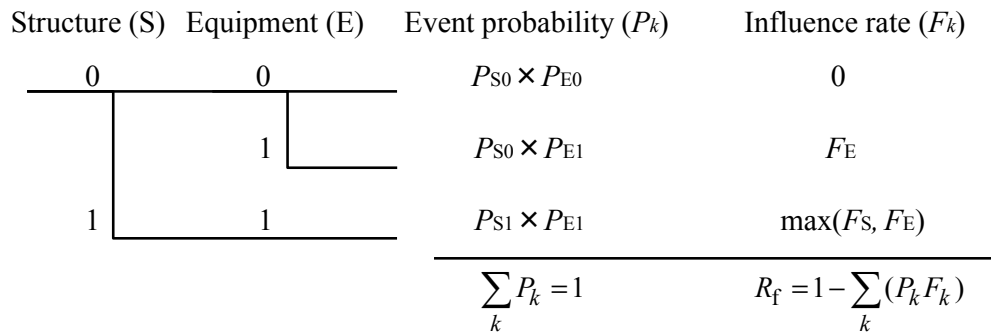


Figure 2-13 Event tree and functional maintenance rate of building.

Table 2-13 Influence rate<sup>[18]</sup>.

	Degree of damage	Interstory drift [rad]	Recovery Time [day]	Influence rate $F_k$
Structure	Little damage	0.0025	1	0.0
	Medium damage	0.005	30	0.5
	Large damage	0.015	300	1.0
	Collapse	0.04	800	1.0
Equipment	Collapse	—	—	1.0

Table 2-14 Functional maintenance rate of building.

	$P_{S1}$	$P_{E1}$	$F_E$	Functional maintenance rate
Uncontrolled	0	0.70	1.0	0.30
Building & equipment control	0	0.17	1.0	0.83
Building control	0	0.24	1.0	0.76

## 2.6. 建物機能維持率の評価

本節では建物機能維持率の観点から制御効果の検証を行う。Figure 2-13 に建物被害のイベントツリーと機能維持率の算出方法の概要を示す。これは 1.2.1 項の Figure 1-2 に示したイベントツリーの最もシンプルな場合である。ここでは建物機能を建物（上部構造の層間変形角と免震層変位）と設備（絶対加速度）の直列システムとして表している。建物、設備に対してそれぞれ被害無しの場合を 0、被害有りの場合を 1 とし、発生確率  $P_k$  とその影響度係数  $F_k$  で評価を行う。機能維持率  $R_f$  の計算式を式(2-49)に示す。

$$R_f = 1 - \sum_k (P_k F_k) \quad (2-49)$$

発生確率  $P_k$  は検討した地震動 100 波のうち、閾値を超過した割合として与える。発生確率  $P_k$  を算出するための閾値には Table 2-4 に示した性能目標を設定した。すなわち、建物上部構造に関しては層間変形角  $1/300$  rad、免震層変位については  $0.5$  m、設備の絶対加速度については  $1.0$   $m/s^2$  を与えた。なお、建物上部構造については非制御時に線形弾性の仮定が成り立つ範囲での解析を行ったため、層間変形角で  $1/200$  rad (Medium damage) を超えない。また、免震建築物の基準である  $1/300$  rad も越えなかった。建物および設備の影響度係数  $F_k$  は境・加藤<sup>[18]</sup>の研究より Table 2-13 に示す値を用いるものとする。ただし、建物の応答については層間変形角、免震層変位ともに閾値を越えなかったため、建物に関しては影響度係数が 0 の範囲とみなす。

建物機能維持率について Table 2-14 にまとめる。これより、提案手法（建物-設備制御）により建物の機能維持率が建物制御と比較して向上したことが確認できる。

また、本提案手法をさらに発展させ、確率論的地震リスク評価手法に基づき、設備機器の被害を低減するように建物の最適制御について設計変数を決定する手法<sup>[90], [91]</sup>が提案されている。

## 2.7. 結言

本章では建物の構造的安全性を保ちつつ、建物内設備の損傷を防ぐ制御を行うための評価関数の設定方法について、制御量項間のバランスを取る方法を提案し、その有効性の検証を行った。

まず、提案する無次元化評価関数では、建物の絶対加速度や建物の層間変形角、設備機器の絶対加速度、免震層の変位といった制御対象をそれぞれグループ化したベクトルとして考え、それらの応答を平均的に抑える制御設計方針をとることを示した。そして複数の



制御量を持つ最適レギュレータの評価関数を，性能目標あるいは非制御時の最大応答から設定した参照最大応答を用いて無次元化した制御量の 2 乗和として記述する際に，制御量ベクトルの要素数による基準化を行うことを示した．

建物機能維持率の評価より，提案する無次元化評価関数は建物機能継続の観点から建物被害の低減を行えることが示せた．

今後の課題として，評価関数の改良に関して，制御対象の振動特性や，建物の敷地で想定される地震動の特性を考慮し，性能目標を周波数領域で設定すること，制御量間の相関を考慮し性能目標を設定することが挙げられる．

### 第3章 早期復旧に向けた最大要求制御力の推定に 基づく可変ゲインフィードバック制御

### 3.1. 緒言

本章では建物機能継続のための評価項目(2)早期復旧を目的として、最適レギュレータの評価関数の制御量項および制御力項の設計から振動応答の収束速度の向上を達成する。ここで提案するのは地震動強度と建物応答レベルの時間変化に応じて振動応答を低減させる対象（制御量に設定する物理量）を適切に切り替え、制御力を装置能力内に収めるように切り替える、可変ゲインフィードバック制御に基づいた手法である。ゲインを可変とすることにより、飽和と非制御状態を回避した制御力の効果的な使用を可能とし、振動応答の収束速度を向上させる。また、制御目的を時変とすることにより効率の良い応答低減を実現する。本章では例として建物・エレベータ連成系に対して制御設計方法を示す。また、提案した制御系の有効性を検証するために、建物・エレベータ連成系において振動問題がより顕在化しやすい長周期地震動を入力とした数値解析を行う。

### 3.2. 制御系設計モデル

解析対象は超高層建物とエレベータ（ロープおよび、それに付随する巻上機とかご室）とし、解析モデルを Figure 3-1 に示す。なお、解析対象の上下および回転方向の振動については、水平せん断方向の振動に比べて小さいものと考え、水平せん断方向のみを考慮したモデルとする。3.1 節で述べた通り、本章では入力として長周期地震動の原波、および建設省告示の加速度応答スペクトルをもつ地震動（レベル 1 の告示波）、最大速度が 25 cm/s となるようにスケーリングを行った標準 3 波（El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS）を扱う。そのため、本章では制御系設計モデルと検証モデルに対して本節で述べるモデル化における仮定が成り立つものと考え、ともに線形モデルを用いる。

文献[33]を参考に建物を層数  $N_f$  のせん断質点系で、エレベータロープを分割数  $N_r$  の弦の有限要素でモデル化する。エレベータロープの横振動解析について、波の反射を逐次図式解法的に検討した厳密解と、差分法による解の比較検討が行われており、厳密解と差分法による計算結果は差分法における分割数を 200 として計算すれば厳密解とよく一致することが示されている<sup>[92]</sup>。また、差分法による解析の妥当性の実験的検証が、実機サイズのエレベータロープを用いて行われており、差分法による解析結果と実験結果が良く一致することが示されている<sup>[93]</sup>。一方、有限要素法と差分法の比較検討が木村ら<sup>[94]</sup>により行われている。そこでは、有限要素の分割数  $N_r$  を 20 以上とすることで最大変位応答が差分法との誤差 10% 以内で概ね一致すること、また、差分法（分割数 200）と有限要素法の周波数応答特性が有限要素の分割数  $N_r = 20$  までは最大値および固有周期でよく一致することが示されている。そこで検討されている入力地震動は標準 3 波（El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS）や 2004 年新潟県中越地震 K-NET 新宿観測記録 EW 成分の原波等である。これらを含む地震動について本章では検討を行っているが、本章では標準 3 波に関しては最大速度を 25 cm/s に基準化したものを用いており、外乱のレベルは既往研究の検討ケースと比較して小さい。また、建物モデルについては 32 ~ 240 m のものが検討されており、本章で扱う 240 m レベルの建物も含まれている。したがって本章ではロープを  $N_r \geq 20$  有限要素としてモデル化し、検討を行うものとする。なお、本章において、かご室は地震





1次固有円振動数 $\omega_{b1}$ と建物の減衰定数 $\zeta_b$ を用いて次式で与える．

$$c_{bn} = \frac{2\zeta_b k_{bn}}{\omega_{b1}} \quad (n = 1, 2, \dots, N_f) \quad (3-10)$$

本章では，制御力の推定と制御対象の切り替えを行う制御の有効性の検証を目的としているため，エレベータのかご室の位置についてはロープが振動する1ケースを取り上げて解析を行う．エレベータのかご室の位置はかご室が建物の低層階にあるほどロープの振動が大きくなることが示されている<sup>[96], [97]</sup>ので，建物モデルの下から1質点目の高さとする．なお，実際にはエレベータは1つの建物の中に複数存在し，エレベータの種類やかご室の位置等，様々な状況が考えられる．今後の課題として，これらの状況を考慮できる制御手法への拡張が挙げられる．また，有限要素法では要素分割数を大きくするほど実際の応答に近い解析結果を得ることができる．木村ら<sup>[94]</sup>はロープの分割数を20以上とすることで誤差を10%程度以内にできることを示している．また，北・小檜山<sup>[97]</sup>によればロープの応答が卓越するのは15次モード程度以下なので，分割数は20以上で十分といえる．

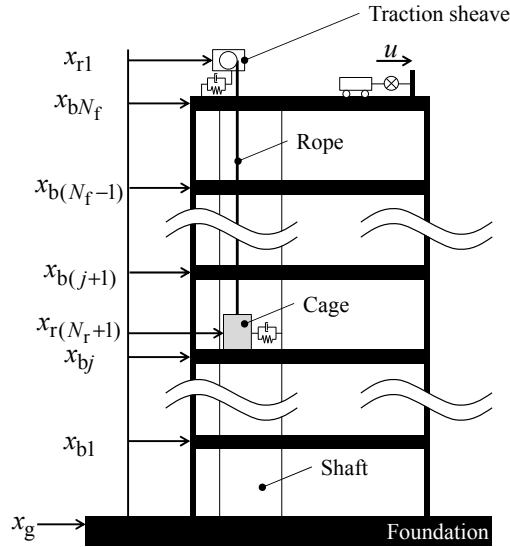


Figure 3-1 Analysis model.

Table 3-1 Physical parameters.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Layer height (twice of the story height)	$h$	8.0	m
Number of layers (half of the number of stories)	$N_f$	30	–
Fundamental period of the building	$T_1$	5.8	s
Damping factor of the building	$\zeta_b$	0.01	–
Mass of the $n$ -th layer of the building	$m_{bn}$	$2.0 \times 10^6$	kg
Mass of the traction sheave	$m_t$	$1.9 \times 10^4$	kg
Stiffness between the traction sheave and the top layer of the building	$k_t$	$3.0 \times 10^6$	kg/s <sup>2</sup>
Damping coefficient between the traction sheave and the top layer of the building	$c_t$	$4.7 \times 10^4$	kg/s
Mass of the elevator cage	$m_c$	$7.5 \times 10^3$	kg
Line density of the elevator rope	$\rho A$	1.7	kg/m
Stiffness between the elevator cage and the building	$k_c$	$2.7 \times 10^5$	kg/s <sup>2</sup>
Damping coefficient between the elevator cage and the building	$c_c$	$9.0 \times 10^3$	kg/s
Damping factor of the elevator rope	$\zeta_r$	0.008	–
Division number of the elevator rope	$N_r$	29	–
Position of the elevator cage (layer number)	$j$	1	–
Distance between the $N_r$ -th layer and the traction sheave	–	0	m
Length of the elevator rope	$L$	232	m
Number of the elevator ropes	$N_{rope}$	5	
Gravity acceleration	$g$	9.8	m/s <sup>2</sup>

Table 3-2 Stiffness coefficient of building.

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
[10 <sup>8</sup> N/m]	10.32	10.29	10.24	10.18	10.11	10.02	9.91	9.78	9.64	9.47
Layer	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
[10 <sup>8</sup> N/m]	9.30	9.10	8.88	8.65	8.40	8.13	7.84	7.53	7.20	6.84
Layer	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
[10 <sup>8</sup> N/m]	6.47	6.07	5.65	5.19	4.71	4.19	3.63	3.02	2.34	1.52

### 3.3. LQR 制御の制御特性と周波数整形 LQG 制御の定式化

本節では LQR 制御の評価関数を基に制御則を構築する．基本となる LQR 制御として，Kohiyama and Baba<sup>[28]</sup>に倣い，次の 3 つを考える．

- 建物の絶対加速度を制御目的とする出力フィードバック
- 建物の層間変形角を制御目的とする出力フィードバック
- 建物とロープの相対距離を制御目的とする出力フィードバック

各制御の出力方程式は状態ベクトル  $\mathbf{x}_{ss} = \{\mathbf{x}^T \quad \dot{\mathbf{x}}^T\}^T$  を用いて以下のように係数マトリクス  $\mathbf{C}_a, \mathbf{C}_s, \mathbf{C}_r$  および係数ベクトル  $\mathbf{D}_a$  を用いて表せる．ここで  $\mathbf{I}$  は単位マトリクスである．

- 建物の絶対加速度の出力方程式

$$\mathbf{y}_a = \mathbf{C}_a \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{D}_a u \quad (3-11)$$

$$\mathbf{C}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{N_f \times N_f} & \mathbf{O}_{N_f \times N_{r+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

$$\mathbf{D}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{N_f \times N_f} & \mathbf{O}_{N_f \times N_{r+1}} \end{bmatrix} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f} \quad (3-13)$$

- 建物の層間変形角の出力方程式

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{C}_s \mathbf{x}_{ss} \quad (3-14)$$

$$\mathbf{C}_s = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} 1 & & & & \mathbf{O} \\ -1 & 1 & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & -1 & 1 & \\ \mathbf{O} & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{O}_{N_f \times (N_f + 2N_r)} \quad (3-15)$$

- 建物とロープの相対距離の出力方程式

$$\mathbf{y}_r = \mathbf{C}_r \mathbf{x}_{ss} \quad (3-16)$$



$$C_r = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -1 \\ & \ddots & & \ddots & \mathbf{0}_{N_r \times (N_r + N_r)} \\ \mathbf{0} & 1 & -1 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

LQR の評価関数では制御目的と制御入力とのトレードオフを考えている。制御目的とする出力のオーダーが異なると、制御入力に対して同じ比の制御重みを与えても制御性能が大きく異なることが起こりうる。そこで性能目標をもとに上記 3 つの出力間でオーダーを揃える補正を行う<sup>[98]</sup>。性能目標には次の値を採用する。

- 層間変形角 1/200 rad：建築物の耐震設計では、稀に生じる地震に対しては層間変形角を 1/200 rad 以下としている。
- 床応答加速度 15 m/s<sup>2</sup>：建物モデルに対する時刻歴応答解析を複数の地震動について行い、最大層間変形角応答と最大絶対加速度応答の関係を求め、約 1/200 rad（層間変形角の閾値）の最大層間変形角が生じるときの最大絶対加速度応答から設定。
- 建物とロープの相対距離 0.3 m：文献[97]で用いられているロープの引っ掛かり事故が懸念される距離から設定。なお、この値はエレベータの種類により変わりうる。

これらをもとに、床応答加速度を基準として建物の層間変形角ならびに建物とロープの相対距離の出力に補正（2 章で示した無次元化に相当）を施した係数マトリクス  $C'_s, C'_r$  は次式となる。

$$C'_s = \frac{15}{5 \times 10^{-3}} C_s \quad (3-18)$$

$$C'_r = \frac{15}{0.3} C_r \quad (3-19)$$

上記 3 つの制御の制御特性について検討した結果、建物の振動抑制には、低振動数領域で建物の層間変形角制御を、高振動数領域で建物の絶対加速度制御を行うことが望ましく、ロープの振動抑制には、低振動数領域で建物とロープの相対距離制御を、高振動数領域で建物の絶対加速度制御を行うことが望ましいことが確認されている<sup>[28]</sup>。制御量に対して振動数領域で重みをかける周波数整形 LQG 理論<sup>[89]</sup>を適用し、建物の振動抑制のための評価関数とロープの振動抑制のための評価関数を構築する<sup>[28]</sup>。

LQG 理論では解析対象を以下のような線形状態方程式と出力方程式で表現する。

$$\dot{\mathbf{x}}_{ss} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{ss} + \mathbf{B}u + \mathbf{G}w \quad (3-20)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}_{ss} + \mathbf{D}u + v \quad (3-21)$$

ここで、 $w$  はシステム雑音、 $v$  は観測雑音と呼ばれ、互いに独立な平均 0 の正規分布に従う正規白色雑音とする。評価関数には、LQR と同様に 2 次形式のものを採用し、次のように設定する。

$$J = E[\mathbf{y}^T \mathbf{y} + Ru^2] \quad (3-22)$$

ここで確率過程はエルゴード過程を仮定している。式(3-22)を Parseval の公式を用いて次のように書き換える。

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[\mathbf{Y}^*(j\omega)\mathbf{Q}(j\omega)\mathbf{Y}(j\omega) + U^*(j\omega)R(j\omega)U(j\omega)] d\omega \quad (3-23)$$

ここで、\*は複素共役転置を表す。 $\mathbf{Q}(j\omega), R(j\omega)$  は  $\omega^2$  の有理多項式から成る周波数重みで、複素関数とその複素共役転置した関数に式(3-24), (3-25)のように因数分解できるものとする。

$$\mathbf{Q}(j\omega) = \bar{\mathbf{Q}}^*(j\omega)\bar{\mathbf{Q}}(j\omega) \quad (3-24)$$

$$R(j\omega) = \bar{R}^*(j\omega)\bar{R}(j\omega) \quad (3-25)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{Y}}(j\omega) = \bar{\mathbf{Q}}(j\omega)\mathbf{Y}(j\omega), \bar{U}(j\omega) = \bar{R}(j\omega)U(j\omega)$  とすると、式(3-23)は次のようになる。

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E[\bar{\mathbf{Y}}^*(j\omega)\bar{\mathbf{Y}}(j\omega) + \bar{U}^*(j\omega)\bar{U}(j\omega)] d\omega \quad (3-26)$$

$\bar{\mathbf{Q}}(j\omega), \bar{R}(j\omega)$  がプロパーな有理多項式ならば、多入力多出力系の実現を行うことにより、次の状態方程式が得られる。

$$\dot{\mathbf{x}}_Q = \mathbf{A}_Q \mathbf{x}_Q + \mathbf{B}_Q \mathbf{y} \quad (3-27)$$

$$\mathbf{z}_Q = \mathbf{C}_Q \mathbf{x}_Q + \mathbf{D}_Q \mathbf{y} \quad (3-28)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_R = \mathbf{A}_R \mathbf{x}_R + \mathbf{B}_R u \quad (3-29)$$

$$\mathbf{z}_R = \mathbf{C}_R \mathbf{x}_R + \mathbf{D}_R u \quad (3-30)$$

ここで、制御量  $\mathbf{y}$  が式(3-31)で表されると仮定する。

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_y \mathbf{x}_{ss} + \mathbf{D}_y u \quad (3-31)$$

式(3-20)および式(3-27)~(3-30)より、次のように拡大系を構成する。

$$\dot{\tilde{\mathbf{z}}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{B}}u \quad (3-32)$$

$$J = E[\tilde{\mathbf{z}}^T \tilde{\mathbf{Q}}\tilde{\mathbf{z}} + 2\tilde{\mathbf{z}}^T \tilde{\mathbf{S}}u + \tilde{R}u^2] \quad (3-33)$$

$$\tilde{\mathbf{z}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_{ss} \\ \mathbf{x}_Q \\ \mathbf{x}_R \end{Bmatrix} \quad (3-34)$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{B}_Q \mathbf{C}_y & \mathbf{A}_Q & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{A}_R \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}_Q \mathbf{D}_y \\ \mathbf{B}_R \end{Bmatrix} \quad (3-36)$$

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_y^T \mathbf{D}_Q^T \mathbf{D}_Q \mathbf{C}_y & \mathbf{C}_y^T \mathbf{D}_Q^T \mathbf{C}_Q & \mathbf{O} \\ \mathbf{C}_Q^T \mathbf{D}_Q \mathbf{C}_y & \mathbf{C}_Q^T \mathbf{C}_Q & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{C}_R^T \mathbf{C}_R \end{bmatrix} \quad (3-37)$$

$$\tilde{\mathbf{S}} = \begin{Bmatrix} \mathbf{C}_y^T \mathbf{D}_Q^T \mathbf{D}_Q \mathbf{D}_y \\ \mathbf{C}_Q^T \mathbf{D}_Q \mathbf{D}_y \\ \mathbf{C}_R^T \mathbf{D}_R \end{Bmatrix} \quad (3-38)$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{D}_y^T \mathbf{D}_Q^T \mathbf{D}_Q \mathbf{D}_y + \mathbf{D}_R^T \mathbf{D}_R + \mathbf{R} \quad (3-39)$$

式(3-33)の評価関数を最小とする最適制御入力は次式で与えられる。

$$u = -\tilde{\mathbf{F}}\tilde{\mathbf{z}} \quad (3-40)$$

$$\tilde{\mathbf{F}} = \tilde{\mathbf{R}}^{-1} (\tilde{\mathbf{S}}^T + \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{P}}) \quad (3-41)$$

ここで  $\tilde{\mathbf{P}}$  は以下の Riccati 方程式から一意に決定される。

$$\tilde{\mathbf{P}} (\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{S}}^T) + (\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{S}}^T)^T \tilde{\mathbf{P}} - \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{P}} + \tilde{\mathbf{Q}} - \tilde{\mathbf{S}} \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{S}}^T = \mathbf{O} \quad (3-42)$$

本章では、次の制御を実現するために、周波数整形 LQG 理論を用いて拡大系を設定する。

#### 建物の振動抑制

低振動数領域：建物の層間変形角制御

高振動数領域：建物の絶対加速度制御

#### ロープの振動抑制

低振動数領域：建物とロープの相対距離制御

高振動数領域：建物の絶対加速度制御

重み関数としては以下に示すハイパスフィルタ  $\bar{Q}_H(s)$  とローパスフィルタ  $\bar{Q}_L(s)$  を用いる。

$$\bar{Q}_H(s) = \left( \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_H \omega_H s + \omega_H^2} \right)^2 \quad (3-43)$$

$$\bar{Q}_L(s) = \left( \frac{\omega_L^2}{s^2 + 2\zeta_L \omega_L s + \omega_L^2} \right)^2 \quad (3-44)$$

ここで、フィルタのパラメータは制御時の周波数特性に対する検討から 1.5 Hz で切り替わるように、 $\zeta_H = \zeta_L = 0.6$ 、 $\omega_H/(2\pi) = \omega_L/(2\pi) = 1.5$  とする。フィルタ特性を Figure 3-2 に、周波数整形 LQG 制御の例（ロープの振動抑制）を Figure 3-3 ~ Figure 3-5 に示す。それぞれ、各自由度(1 ~ 30)の位置における応答を示している。Figure 3-2 のフィルタによって、各周波数特性が改善されていることが確認できる。

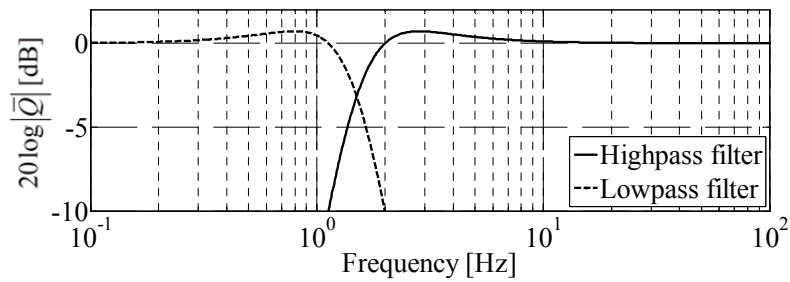
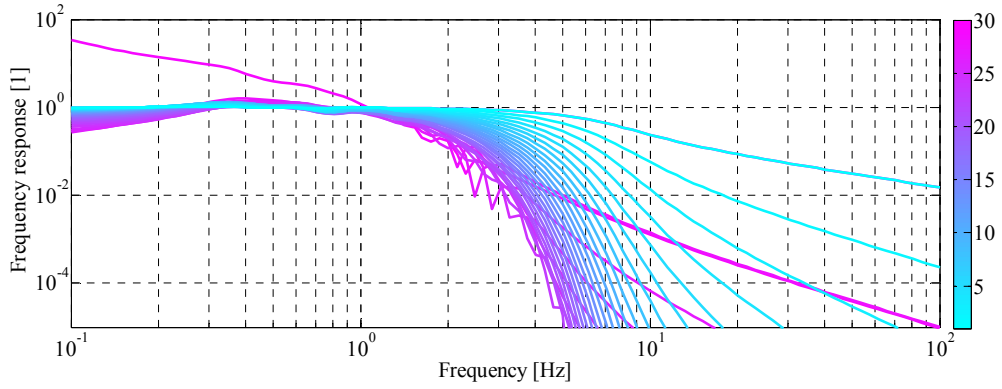
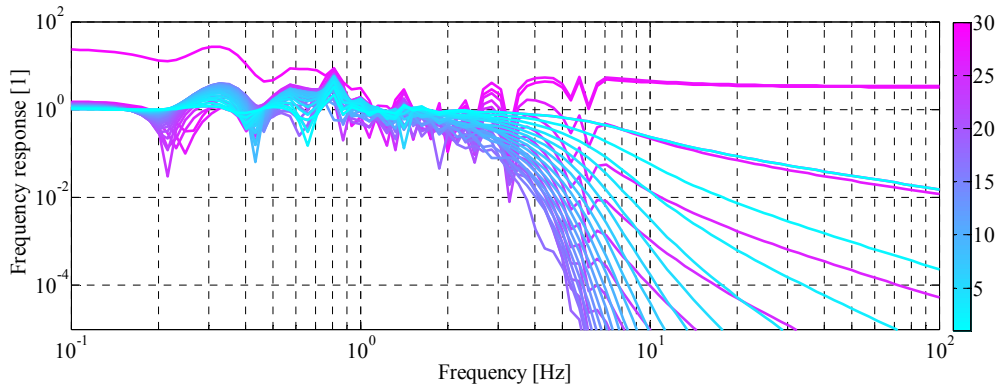


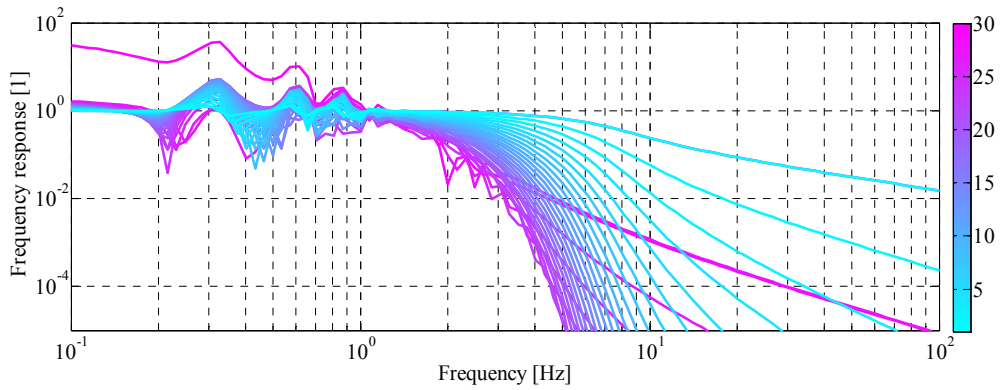
Figure 3-2 Filters.



(a) Building acceleration control.

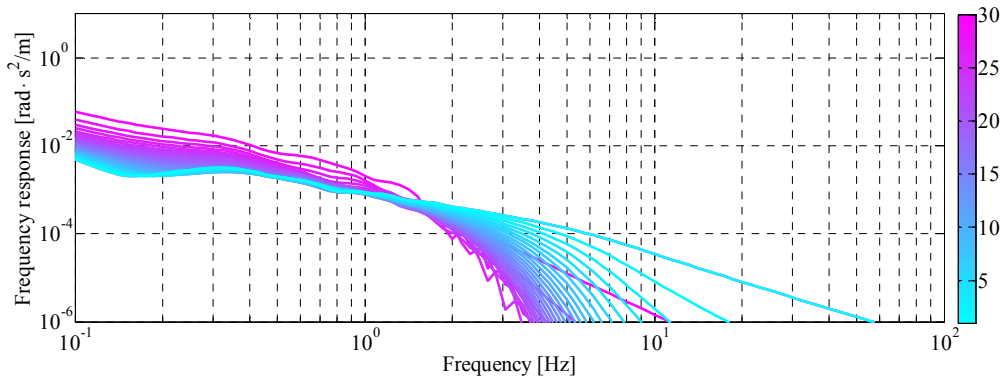


(b) Rope displacement control.

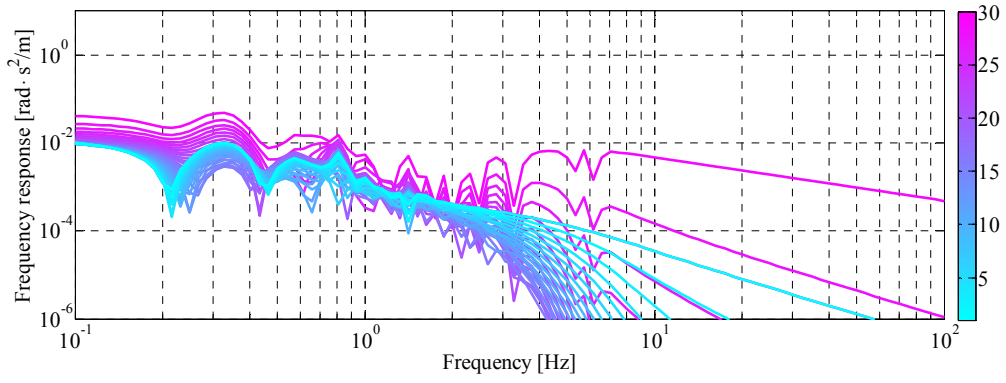


(c) Frequency shaped LQG control (for elevator).

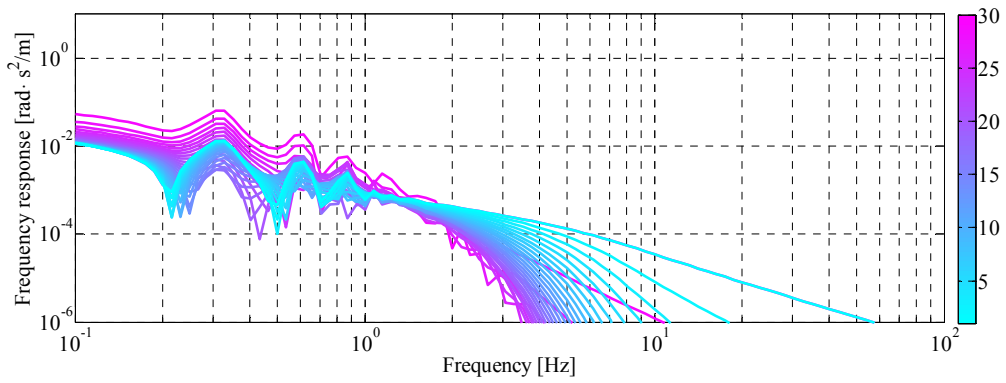
Figure 3-3 Frequency responses of building acceleration.



(a) Building acceleration control.

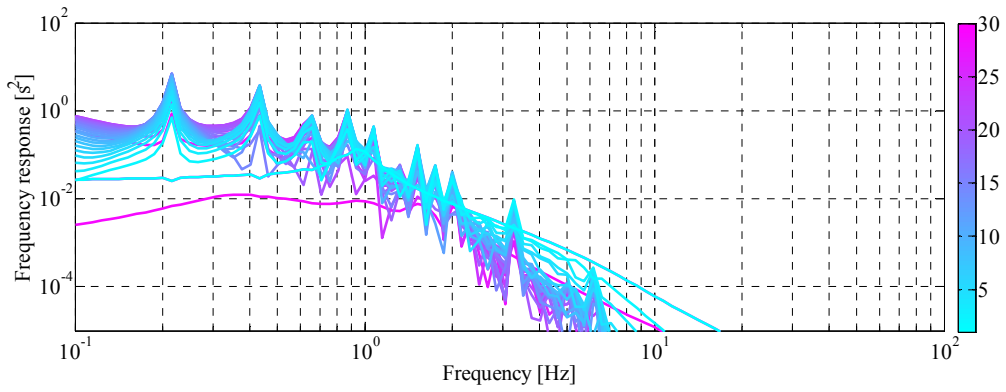


(b) Rope displacement control.

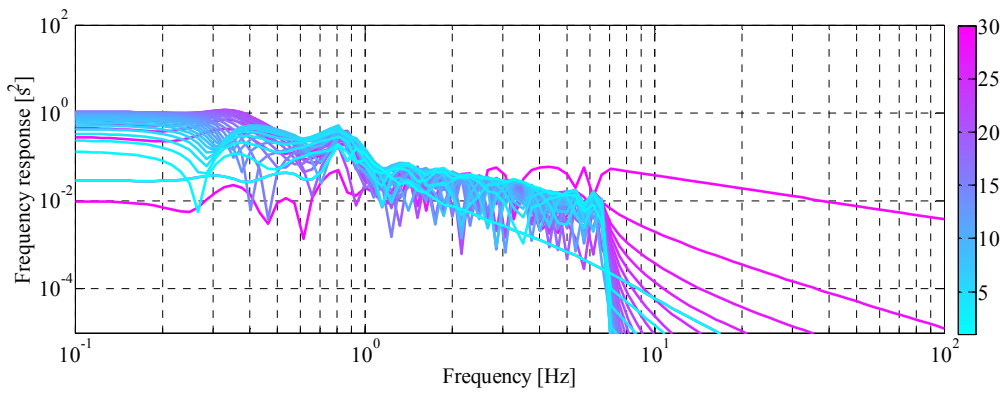


(c) Frequency shaped LQG control (for elevator).

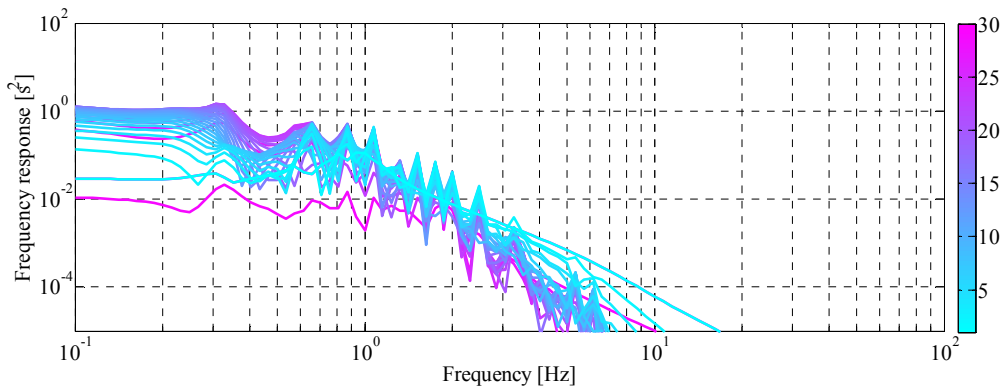
Figure 3-4 Frequency responses of building interstory drift.



(a) Building acceleration control.



(b) Rope displacement control.



(c) Frequency shaped LQG control (for elevator).

Figure 3-5 Frequency responses of rope displacement.

### 3.4. 地震動強さと建物の応答レベルに順応する可変ゲイン制御の提案

#### 3.4.1. 評価関数の設計

評価関数の値を最小化するような最適制御入力  $u$  は、フィードバックゲイン  $G_f$  を用いて次のように与えられる。

$$u = -G_f x_{ss} \quad (3-45)$$

装置能力の限界を考慮し、制御入力  $u_{inp}$  を装置能力（制御力の絶対値の最大値） $u_{lim}$  を用いて次式で与える。

$$u_{inp} = \begin{cases} u & |u| \leq u_{lim} \\ u_{lim} \text{sign}(u) & |u| > u_{lim} \end{cases} \quad (3-46)$$

各制御についてこのような条件を付加し、評価関数における制御力重みの値を変化させたときの時刻歴応答解析の結果を観察したところ、以下の知見を得た。

- 制御性能の限界値で制御入力を頭打ちにすると、限界値を著しく超過した制御力を必要とする場合には、制御することによりかえって応答を悪化させることがある。
- 多少の制御力の飽和ならば応答は悪化せず、一切飽和しないように制御力を低く抑えた場合に比べて応答が良く低減できる傾向がある。

制御装置を有効に活用するためには、装置能力を過不足なく適切な制御対象に使用することが重要となる。Kohiyama and Baba<sup>[28]</sup>は、建物の揺れが大ききときには建物の振動抑制を重視した制御を、建物の揺れが小さいときにはロープの振動抑制を重視した制御を行うよう制御則を変化させる可変ゲインフィードバック制御を提案している。建物・エレベータ連成系に対して、この制御対象の切り替えは有効と考えられる。しかし、制御重みを一定としているため、大きな応答のときには装置能力が飽和し、逆に小さな応答のときには制御力があまり発揮されない問題がある。そこで本章では制御目的（制御量）および制御力に対してフィードバックゲインを可変とする、2 変数による可変ゲインフィードバック制御を考える。可変ゲインフィードバック制御は予め安定性を確認した制御ゲインを用いるため、高次モードに対するスピルオーバー不安定を抑制できる利点がある<sup>[59]</sup>。

評価関数は、式(3-22)をもとに、2 種類の制御目的（建物とロープ）を重み関数  $g_b(\alpha)$  および  $g_r(\alpha)$  によって、制御力の大きさを重み関数  $R(\beta)$  によって変化させるものとし、次式のように表す。

$$J = E \left[ g_b(\alpha) \{ \mathbf{y}_b^T \mathbf{y}_b + R(\beta) u^2 \} + g_r(\alpha) \{ \mathbf{y}_r^T \mathbf{y}_r + R(\beta) u^2 \} \right] \quad (3-47)$$

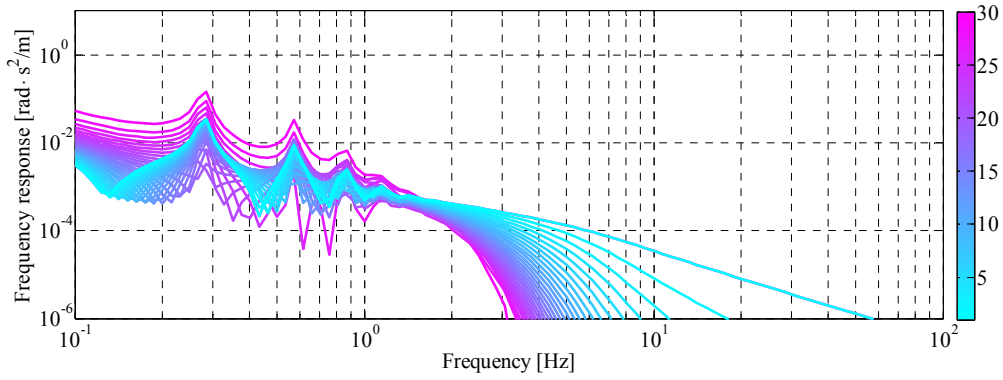
ここで  $\mathbf{y}$  は出力ベクトルで、添え字  $b$  は建物制御、 $r$  はロープ制御に関する量となっている。

複数の制御目的  $\mathbf{y}$ （制御量）が存在する場合の評価関数の設計方法としては、第 2 章で示したように複数の制御目的を同時に考慮する方法と、式(3-47)に示すようにスケジューリングを行う方法が考えられる。同時に考慮する場合の評価関数を式(3-48)に示す。

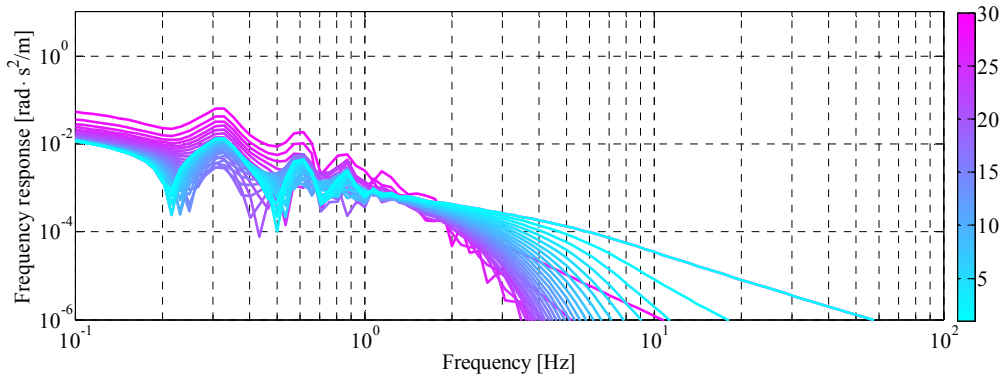


$$J = E \left[ \mathbf{y}_b^T \mathbf{y}_b + \mathbf{y}_r^T \mathbf{y}_r + R(\beta) u^2 \right] \quad (3-48)$$

ここで、建物の制御目的  $\mathbf{y}_b$  として周波数整形 LQG 制御による建物の振動抑制を重視した制御を、エレベーターロープの制御目的  $\mathbf{y}_r$  として周波数整形 LQG 制御によるロープの振動抑制を重視した制御を考える。建物の振動抑制を重視した周波数整形 LQG 制御を行った場合の建物の層間変形角の周波数応答を Figure 3-6 (a) に、ロープの振動抑制を重視した周波数整形 LQG 制御を行った場合の建物の層間変形角の周波数応答を Figure 3-6 (b) に示す。また同様に、建物の振動抑制を重視した周波数整形 LQG 制御を行った場合の建物とロープの相対距離の周波数応答を Figure 3-7(a) に、ロープの振動抑制を重視した周波数整形 LQG 制御を行った場合の建物とロープの相対距離の周波数応答を Figure 3-7(b) に示す。Figure 3-6 から、ロープの制御をすることが、高振動数領域で建物の層間変形角を悪化させうると考えられる。また逆に Figure 3-7 より、建物の制御をすることが、低振動数領域で建物とロープの相対距離を悪化させうると考えられる。したがって本章で取り扱う制御対象に対しては、同時に考慮するよりもスケジューリングが有効と考えられる。Figure 3-8 に制御目的を同時考慮 ( $\alpha = 0.5$  に固定) した場合とスケジューリングした場合の比較を示す。ここで重み係数の更新については 3.4.3 項に示す方法を用いている。Figure 3-8 (c) に示すように制御力は、 $R$  を Figure 3-8 (b) のように変化させることにより両手法ともに同程度となっている。このとき応答の低減効果は Figure 3-8 (d), (e) に示すように建物とロープの両方においてスケジューリングした場合の方が同時考慮の場合よりも高いことが確認できる。そこで本章では式(3-47)に示すように、制御目的に関してもスケジューリングを行う設計とする。

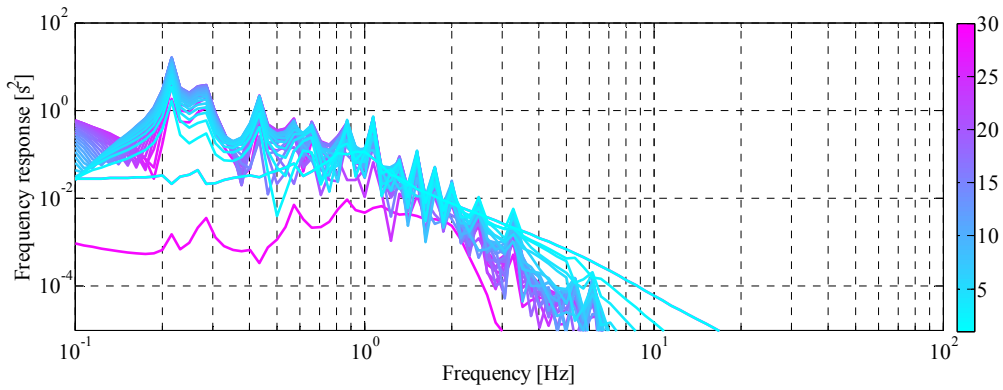


(a) Building control.

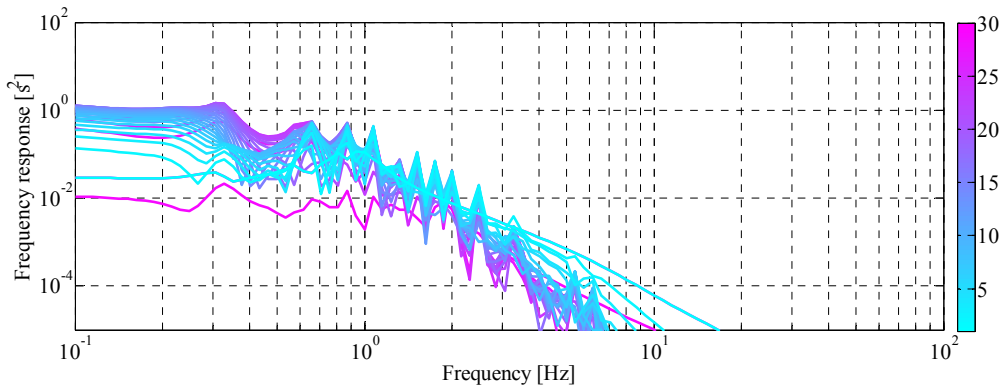


(b) Rope control.

Figure 3-6 Frequency responses of building interstory drift.

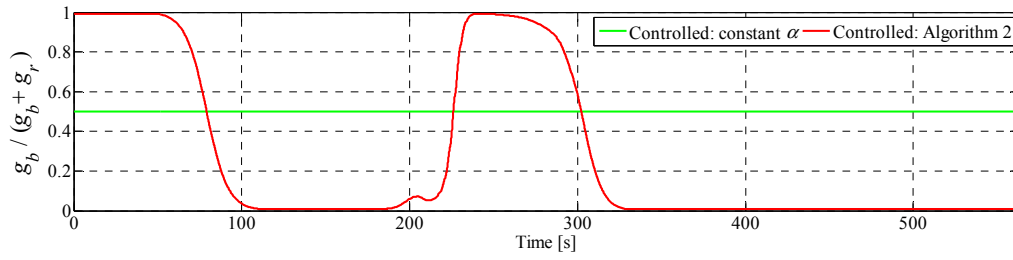


(a) Building control.

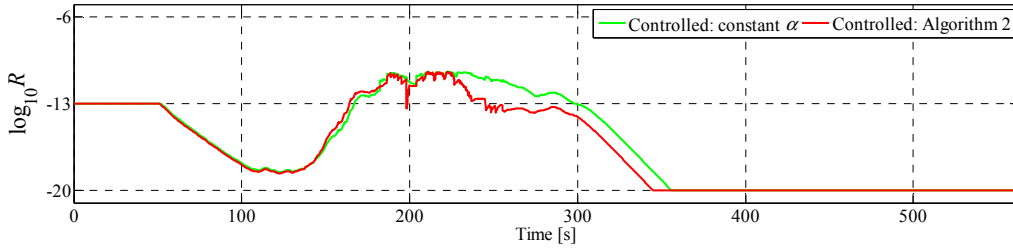


(b) Rope control.

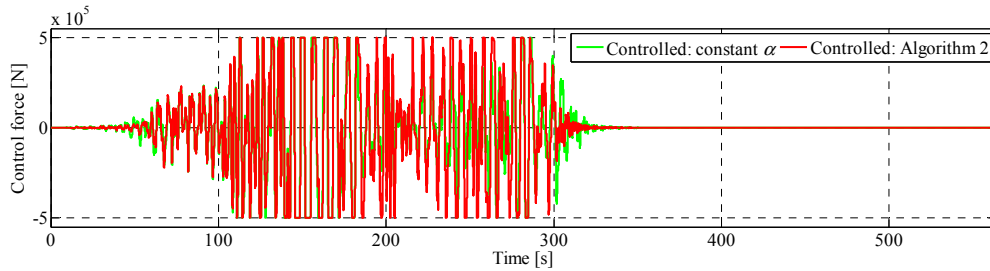
Figure 3-7 Frequency responses of rope displacement.



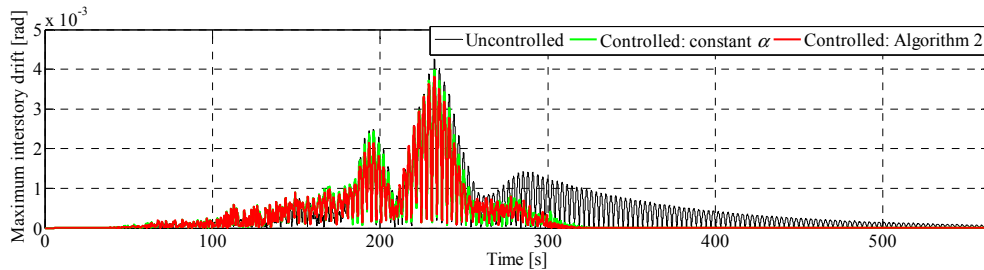
(a) Weighting functions of  $\alpha$ .



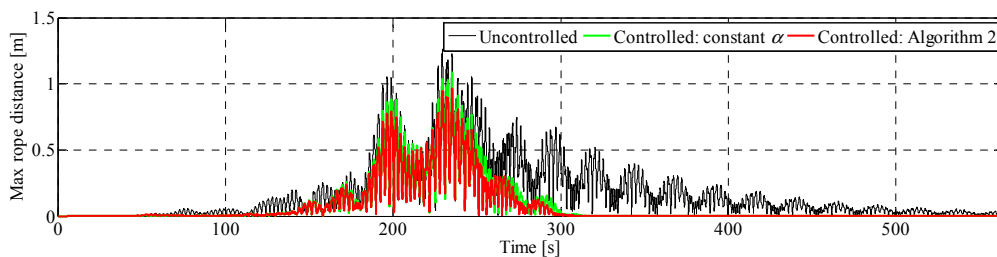
(b) Weighting function of  $\beta$ .



(c) Control force.



(d) Maximum response of interstory drift.



(e) Maximum response of distance between building and elevator rope.

Figure 3-8 Comparative analysis of constant objective and variable objective.

(KiK-net record of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake)

Table 3-3 Natural periods and damping factors.

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Natural period [s]	5.82	4.69	2.34	2.22	1.56	1.38	1.17	1.05	1.00	0.93
Damping factor [%]	0.997	0.801	0.403	2.608	0.278	4.213	0.326	9.739	5.815	0.236

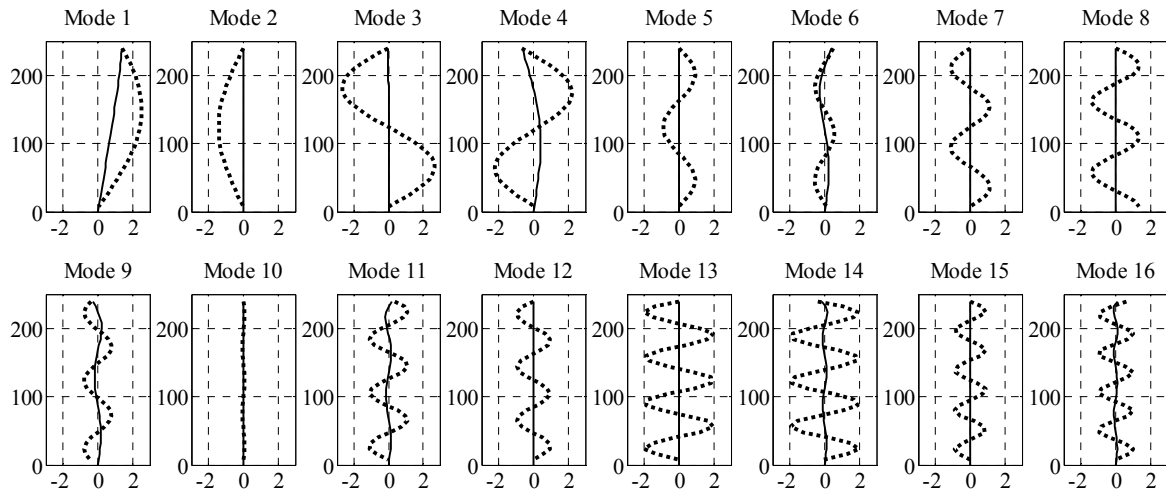


Figure 3-9 Undamped modal participation vectors.  
(Solid line: Building, Broken line: Rope)

解析対象の固有値解析を行った結果として，Table 3-3 に 10 次までの固有周期とモード減衰定数を，Figure 3-9 に 16 次までの刺激関数を示す．Figure 3-9 の刺激関数に示されるように，ロープが高次のモードでも振動することが確認されているため，ここでは高さ方向の平均応答を制御する LQG 制御とする．評価関数  $J$  内の重み関数の定式化は文献<sup>[28], [59]</sup>を参考に，次のように行う．ただし，本章ではロープの張力は長さ方向で一定と仮定しているため，刺激関数は長さ方向に対称形となっている．実際はロープ下部の方が上部よりも張力が小さいため変位が大きくなる傾向がある<sup>[99]</sup>．

- 制御目的に関する重み関数  $g_b(\alpha)$  および  $g_r(\alpha)$   
重み関数を以下のように置く．

$$g_b(\alpha) = a_b \exp\left(\frac{\alpha}{b_b}\right) \quad (3-49)$$

$$g_r(\alpha) = a_r \exp\left(\frac{\alpha}{b_r}\right) \quad (3-50)$$

ここで， $\alpha$  を大きくするとロープの振動抑制を重視した制御になり，小さくすると建物の振動抑制を重視した制御になるようにパラメータを設定する．それぞれの関数の最大値  $g_{bH}$ ， $g_{rH}$  および最小値  $g_{bL}$ ， $g_{rL}$  は  $\alpha$  の最小値  $\alpha_{\min}$  と最大値  $\alpha_{\max}$  を用いて次のように表すことがで

きる .

$$g_{bL} = g_b(\alpha_{\max}) = a_b \exp\left(\frac{\alpha_{\max}}{b_b}\right) \quad (3-51)$$

$$g_{bH} = g_b(\alpha_{\min}) = a_b \exp\left(\frac{\alpha_{\min}}{b_b}\right) \quad (3-52)$$

$$g_{rL} = g_r(\alpha_{\min}) = a_r \exp\left(\frac{\alpha_{\min}}{b_r}\right) \quad (3-53)$$

$$g_{rH} = g_r(\alpha_{\max}) = a_r \exp\left(\frac{\alpha_{\max}}{b_r}\right) \quad (3-54)$$

これらを用いて係数  $a_b, b_b, a_r, b_r$  を決定すると次式が得られる .

$$g_b(\alpha) = g_{bL} \left(\frac{g_{bH}}{g_{bL}}\right)^{\frac{\alpha_{\max} - \alpha}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}} \exp\left(\frac{-\alpha}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \ln \frac{g_{bH}}{g_{bL}}\right) \quad (3-55)$$

$$g_r(\alpha) = g_{rL} \left(\frac{g_{rL}}{g_{rH}}\right)^{\frac{\alpha_{\min} - \alpha}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}} \exp\left(\frac{\alpha}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \ln \frac{g_{rH}}{g_{rL}}\right) \quad (3-56)$$

● 制御力に関する重み関数  $R(\beta)$

重み関数を以下のように置く .

$$R(\beta) = a_R \exp\left(\frac{\beta}{b_R}\right) \quad (3-57)$$

応答が小さいときには  $R$  を小さくし , 過大なときには  $R$  を大きくすれば良い .  $\beta$  を大きくすると制御力に対する重みが小さくなるものとする .  $R$  の最大値  $R_H$  および最小値  $R_L$  は  $\beta$  の最小値  $\beta_{\min}$  と最大値  $\beta_{\max}$  を用いて次のように表すことができる .

$$R_H = R(\beta_{\min}) = a_R \exp\left(\frac{\beta_{\min}}{b_R}\right) \quad (3-58)$$

$$R_L = R(\beta_{\max}) = a_R \exp\left(\frac{\beta_{\max}}{b_R}\right) \quad (3-59)$$

したがって

$$R(\beta) = R_L \left(\frac{R_H}{R_L}\right)^{\frac{\beta_{\max} - \beta}{\beta_{\max} - \beta_{\min}}} \exp\left(\frac{-\beta}{\beta_{\max} - \beta_{\min}} \ln \frac{R_H}{R_L}\right) \quad (3-60)$$

本章では , Table 3-4 のパラメータの値を用いる .

重み関数  $g_b(\alpha), g_r(\alpha), R(\beta)$  を用いると , フィードバックゲイン  $G_f$  は離散的な  $(\alpha_i, \beta_j)$  に対して離散値  $G_{fij}$  として与えられる . ここで ,  $G_f$  の成分のうち ,  $k$  番目の自由度の変位にかかるゲインを  $g_{idk}$  , 速度にかかるゲインを  $g_{ivk}$  と表すこととする . 例として , 建物最上層の変位にかかるフィードバックゲインの  $\alpha, \beta$  の値に対する変動の様子を Figure 3-10 に示す .

既往研究<sup>[28], [59]</sup>ではフィードバックゲインをパラメータの多項式で近似しているが、近似多項式は想定しない極値を発生させることがあり、大きな誤差を含む部分が存在しうる。とくに本手法では2変数関数としてフィードバックゲイン  $G_f(\alpha, \beta)$  を算出するため、誤差が大きくなりうると思われる。そこでゲインの補間は線形内挿とする。線形内挿した結果の妥当性を検討するため、本章で採用した0.02刻みの $\alpha, \beta$ の正方グリッド上で与えたフィードバックゲイン  $G_f$  から補間した0.001刻みのゲインと、0.001刻みの $\alpha, \beta$ の正方グリッド上で与えたフィードバックゲインの誤差を算出したところ、ゲインの値が最も大きい最上層の変位ゲインで誤差率が最大で5.30%と十分に小さかったので、0.02刻みのフィードバックゲインを解析に用いる。また、フィードバックゲインの更新は、一般的なP波感知器の設定値<sup>[12]</sup>が0.025, 0.05, 0.1  $\text{m/s}^2$ であることから、0.05  $\text{m/s}^2$ 以上の加速度が観測されたときとする。

次に本章で比較検討する2種類のゲイン更新手法について述べる。なお、ゲインは制御開始前にオフラインで計算されており、制御時にはゲインの更新の計算のみを行う。提案するシステムの概要を Figure 3-11 に示す。

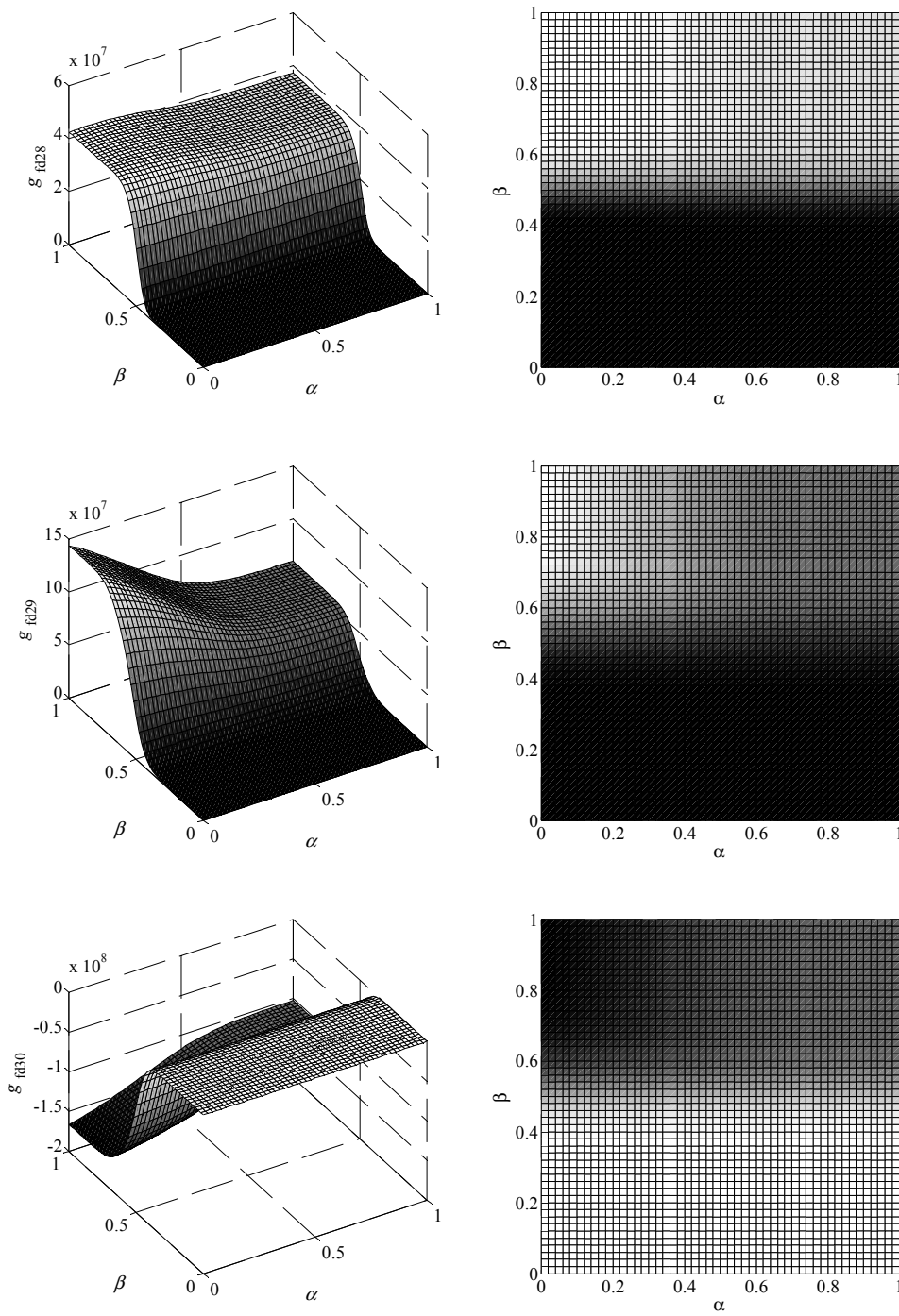


Figure 3-10 Feedback gains.

Table 3-4 Parameters for variable gain.

Symbols	Value	Symbol	Value
$g_{bL}, g_{rL}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$R_L$	$1.0 \times 10^{-20}$
$g_{bH}, g_{rH}$	1.0	$R_H$	$1.0 \times 10^{-6}$
$\alpha$	0.00, 0.02, ..., 1.00	$\beta$	0.00, 0.02, ..., 1.00

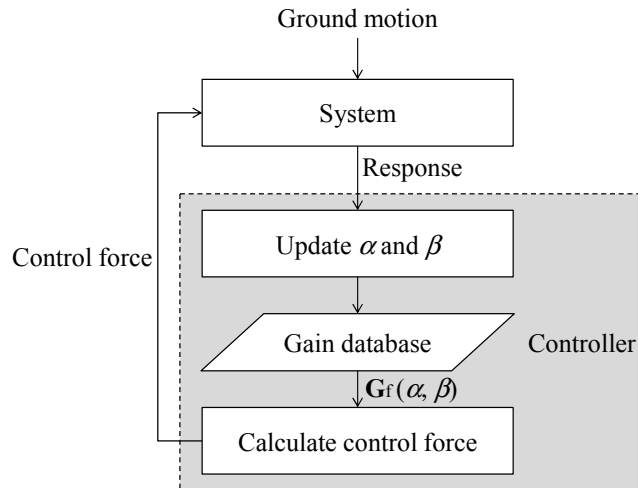


Figure 3-11 Variable gain feedback control system.

### 3.4.2. ゲイン更新手法（比較手法）

既往研究<sup>[28], [59]</sup>で示された手法の組み合わせとして手法 を定式化する。本項で提案する  $\alpha, \beta$  の更新方法の概要を Figure 3-12 に示す。ここで、 $\alpha$  と  $\beta$  は独立なものと考え、Kohiyama and Baba<sup>[28]</sup>の手法で制御目的に関するパラメータ  $\alpha$  を更新し、長島ら<sup>[59]</sup>の手法で制御力に関するパラメータ  $\beta$  を更新する。参考とした手法<sup>[28], [59]</sup>では  $\Delta t$  後の時刻の状態量の予測を次式で行い、ゲイン更新の評価に用いている。

$$\tilde{\mathbf{x}}(t + \Delta t) = \mathbf{x}(t) + \dot{\mathbf{x}}(t)\Delta t \quad (3-61)$$

しかし、 $\Delta t$  後の応答が振動の腹となるとは限らず、応答を過小評価しかねない。そこで現在から過去  $\Delta t_{\text{est}}$  間のデータをパラメータ更新のために参照することとする。 $\Delta t_{\text{est}}$  は、振動の腹を評価するため、解析対象の 1 次固有周期  $T_1 (= 5.8)$  の 2 分の 1 より大きく設定するのが妥当であると考え、3.0 秒とする。以下にゲイン更新のアルゴリズムを示す。なお、アルゴリズム中の添え字はステップ数を示しており、 $i$  はフィードバックゲインの更新ステップ、 $l$  は制御ステップである。

#### 手法 のアルゴリズム

Step 1-1.  $l, i, \alpha_i$  および  $\beta_i$  に初期値を与える。

Step 1-2. 式(3-62)により現在のフィードバックゲインから要求制御力  $u_{\text{req}l}$  を求める。

$$u_{\text{req}l} = -\mathbf{G}_f(\alpha_i, \beta_i)\mathbf{x}_{\text{ssl}} \quad (3-62)$$

Step 1-3. 式(3-46)より制御入力  $u_l$  を求める。

Step 1-4. フィードバックゲインの更新ステップに達した場合は Step 1-5 へ進み、その他の場合は  $l = l + 1$  とし Step 1-2 に戻る。

Step 1-5. 現在から過去  $\Delta t_{\text{est}}$  間の評価時間における層間変形の閾値  $x_{\text{thr}}$  に対する余裕  $\eta_\alpha$ 、お



よび制御力の装置能力  $u_{lim}$  に対する余裕  $\eta_\beta$  を次式により求める .

$$\eta_{\alpha i} = 1 - \max_{I - \Delta t_{est} / \Delta t + 1 \leq s \leq I} \left( \max_k \frac{|x_{ks} - x_{(k-1)s}|}{x_{thr}} \right) \quad (3-63)$$

$$\eta_{\beta i} = 1 - \max_{I - \Delta t_{est} / \Delta t + 1 \leq s \leq I} \left( \frac{|u_{req s}|}{u_{lim}} \right) \quad (3-64)$$

Step 1-6. 式(3-65), (3-66)のように, 閾値および装置能力に対する余裕に更新重み  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$  をかけ,  $\alpha_{i+1}$  および  $\beta_{i+1}$  ( $\alpha_{min} \leq \alpha_{i+1} \leq \alpha_{max}$ ,  $\beta_{min} \leq \beta_{i+1} \leq \beta_{max}$ ) を求め,  $i = i + 1$ ,  $I = I + 1$  とし, Step 1-2 に戻る .

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \Delta\alpha\eta_{\alpha i} \quad (3-65)$$

$$\beta_{i+1} = \beta_i + \Delta\beta\eta_{\beta i} \quad (3-66)$$

手法 で用いるパラメータを Table 3-5 に示す .ここで可変ゲイン制御の速応性を規定するパラメータ  $\Delta\alpha$  および  $\Delta\beta$  は,  $\alpha, \beta$  の設定範囲に対して  $\alpha, \beta$  の変動が大きくなり過ぎない範囲で設定する<sup>[28], [59]</sup> .また, エレベータロープの振動は建物の応答から少し遅れて成長することが報告されている<sup>[100]</sup>ので,  $\alpha$  の初期値  $\alpha_{ini}$  は建物の振動抑制を重視した制御となるように 0 とする .また,  $\beta$  の初期値  $\beta_{ini}$  は, 平成 12 年建設省告示 1461 号における稀に起こる地震動に対して装置能力 500 kN で制御を行ったところ,  $\beta$  は 0.5 近傍で推移したため, 0.5 に設定する .なお, 制御力の最大値  $u_{lim}$  については, 連結制振の事例<sup>[95]</sup>では電動モータ (37 kW × 2 台) で 340 kN とあり, 本章で設定する 500 kN は電動モータで出力可能な範囲と考えられる .また, 油圧アクチュエータの場合は 1000 kN を超える出力のものも実用化されている .

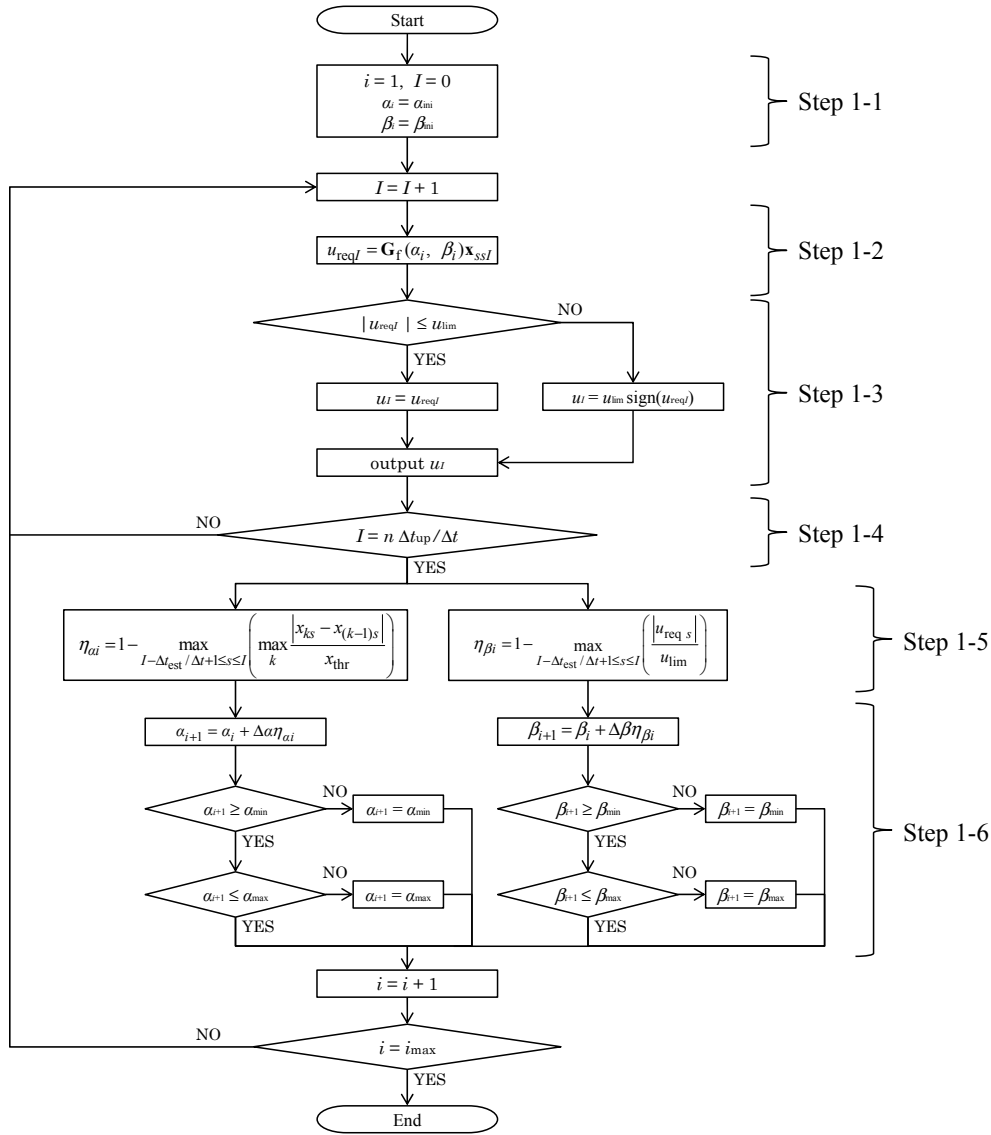


Figure 3-12 Flowchart of algorithm

Table 3-5 Parameters for Algorithm

Parameter	Symbol	Value	Unit
Time step of analysis	$\Delta t$	0.005	s
Threshold value for switching control objectives	$x_{thr}$	$h \times 10^{-3}$	m
Capacity of control force	$u_{lim}$	$5 \times 10^5$	N
The initial value of $\alpha$	$\alpha_{ini}$	0.000	—
The initial value of $\beta$	$\beta_{ini}$	0.500	—
Updating weight of $\alpha$	$\Delta \alpha$	0.002	—
Updating weight of $\beta$	$\Delta \beta$	0.010	—
Updating interval	—	0.1	s
Evaluating time of responses and control force	$\Delta t_{est}$	3.0	s

3.4.3. ゲイン更新手法 (提案手法)

手法 では、評価時間における制御力の余裕  $\eta_\beta$  に更新重み  $\Delta\beta$  を掛けることで制御力に関する重み関数  $R(\beta)$  を更新した。しかし、この方法では変化の激しい振動への速応性に問題が生じる可能性がある。速応性を重視し  $\Delta\beta$  を大きく設定した場合、大きな応答が生じた場合に  $\eta_\beta$  が大きくなり、 $\beta$  は急激に制御力を抑制する状態へと遷移してしまう。この問題を解決するために、最大要求制御力の推定を行うことを考える。本項で提案する  $\alpha, \beta$  の更新方法の概要を Figure 3-13 ~ Figure 3-15 に示す。本手法ではまず、3.4.2 項に示した方法で  $\alpha$  を更新し、その後、最大要求制御力の推定値が装置容量を超えない条件のもとで  $\beta$  を更新する。なお、 $\alpha$  については 3.4.2 項に示した方法を踏襲するものとする。

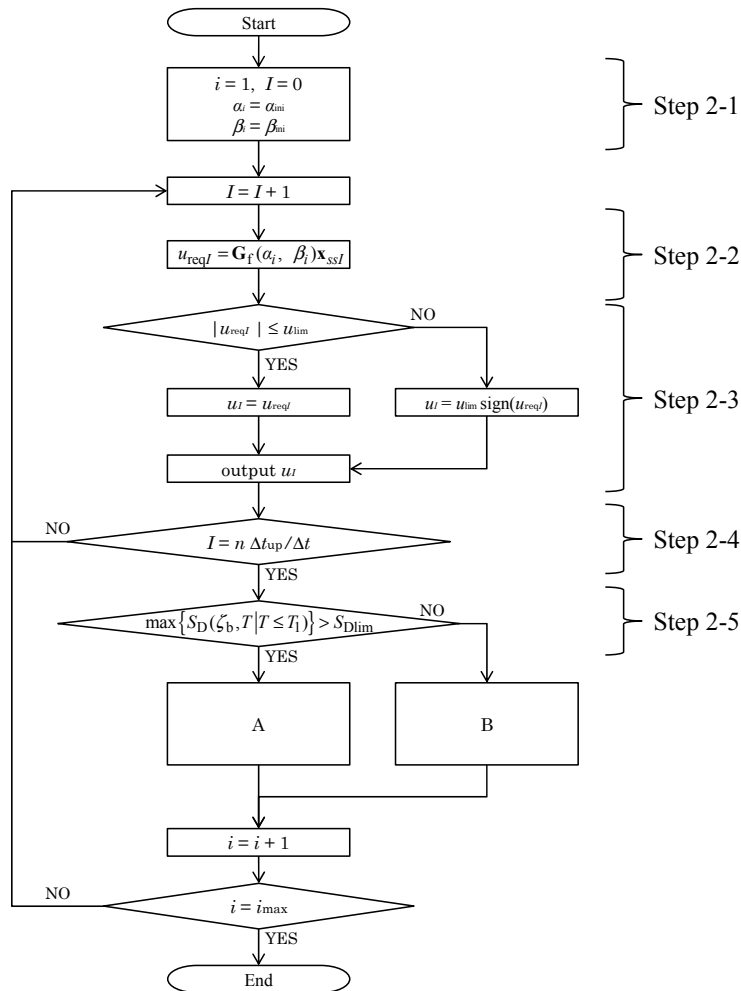


Figure 3-13 Flowchart of algorithm

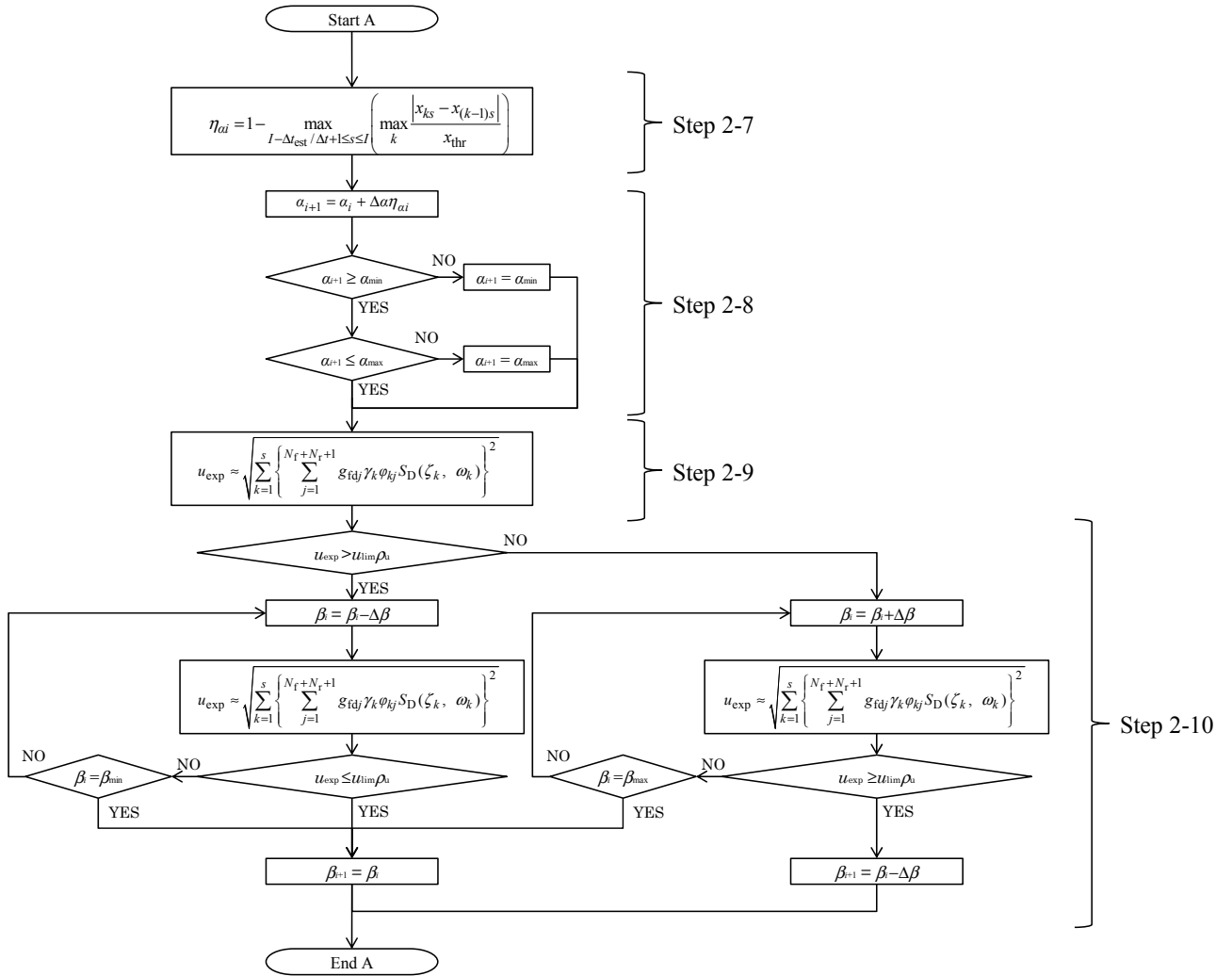


Figure 3-14 Flowchart of algorithm -A.

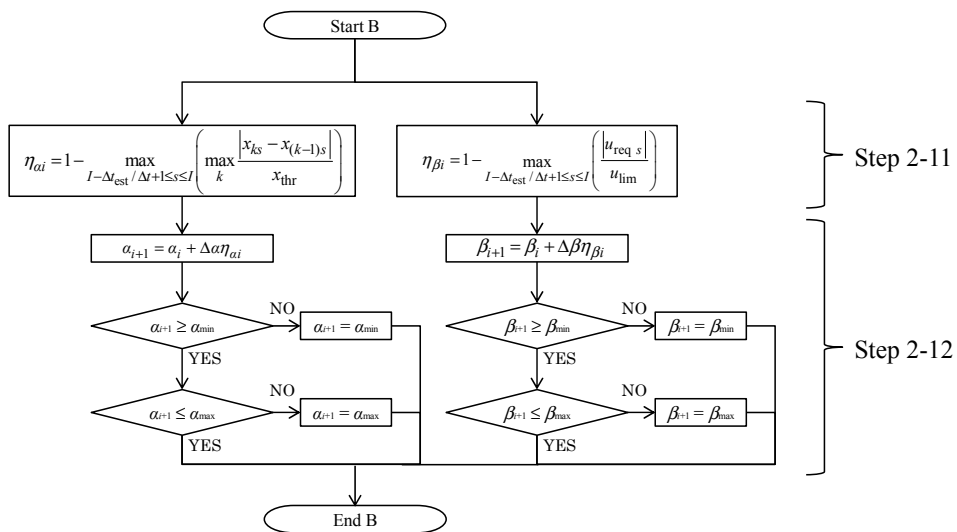


Figure 3-15 Flowchart of algorithm -B.

Table 3-6 Displacement gains and velocity gains.

Building			Elevator rope		
$n$	Displacement gain [ $10^5$ N/m]	Velocity gain [ $10^5$ N·s/m]	$n$	Displacement gain [ $10^5$ N/m]	Velocity gain [ $10^5$ N·s/m]
1	-1.0	0.4	31	30.0	-2.8
2	2.1	0.6	32	-4.9	-1.7
3	2.4	0.7	33	-9.4	-2.9
4	2.6	0.9	34	-13.1	-3.4
5	2.6	1.0	35	-15.5	-3.2
6	2.3	1.1	36	-16.4	-2.6
7	1.8	1.2	37	-15.6	-1.9
8	-2.2	1.4	38	-13.4	-1.6
9	-2.8	1.5	39	-10.5	-1.4
10	-3.3	1.6	40	-7.7	-1.5
11	-3.4	1.7	41	-5.1	-1.8
12	-2.8	1.9	42	-2.7	-2.3
13	3.2	2.0	43	-2.0	-2.8
14	5.1	2.1	44	-1.7	-3.3
15	7.2	2.1	45	2.9	-3.6
16	11.1	2.1	46	2.9	-3.8
17	16.8	2.2	47	2.1	-3.7
18	22.1	2.3	48	-1.5	-3.5
19	24.5	2.6	49	-1.8	-3.1
20	20.9	3.0	50	-1.8	-2.8
21	-17.2	-4.1	51	-1.6	-2.4
22	-37.5	4.8	52	-1.4	-2.1
23	-64.6	6.5	53	-1.2	-1.7
24	-105.2	9.0	54	1.0	-1.4
25	-131.7	14.6	55	1.3	-1.1
26	-90.9	21.6	56	1.6	-0.8
27	231.0	29.5	57	1.8	-0.6
28	427.2	-15.4	58	1.6	-0.4
29	1440.2	-103.5	59	1.0	-0.2
30	-1667.9	125.4	60	16.4	2.9

まず，最大要求制御力の推定方法について示す．フィードバックゲイン  $G_f$  を変位ゲイン  $G_{fd}$  と速度ゲイン  $G_{fv}$  に分けると制御力は次式のように変位と速度の一次結合で表される．

$$u = -G_f x_{ss} = -G_{fd} x - G_{fv} \dot{x} \quad (3-67)$$

ここで，変位の最大値が生じているときの速度は零であり，速度の最大値が生じているときの変位は零に近いことより，最大要求制御力の推定の際には変位か速度のいずれか一方の項を省略する．全自由度（自由度番号  $n$ ）に対するフィードバックゲイン曲面の最大値（絶対値で最大となる値）の比較を Table 3-6 に示す．これより，変位ゲインは速度ゲインに比べ， $10 \text{ s}^{-1}$  倍よりも大きいことが分かった．一方， $k$  次モードでの単振動を考えると，変位振幅  $|x|$  と速度振幅  $|\dot{x}|$  の関係は  $k$  次の固有周期  $T_k$  を用いて次式で表せる．

$$|\dot{x}| = \frac{2\pi|x|}{T_k} \quad (k=1, 2, \dots) \quad (3-68)$$

Table 3-3 に示した固有周期の値を  $T_k$  に代入し，変位振幅と速度振幅の関係を概算した結果，速度応答が変位応答の値の  $10 \text{ s}^{-1}$  倍以上の値となることは低次モードの振動では無いと仮定できる．以上のことより本解析対象に対しては最大要求制御力の推定は変位から行うこととする．

本章では，モーダルアナリシスを参考に最大要求制御力を求める．モーダルアナリシスにはいくつか種類があり，SRSS (Square Root of Sum of Squares)法<sup>[101]</sup>は各モードが十分に分離している系については極めて有効であるが，モード間の位相差や重合性が重要となるような問題に対しては CQC (Complete Quadratic Combination)法<sup>[102]</sup>等のモード相関を考慮した手法が有効となる．また，非比例減衰系を取り扱える CCQC (Complex Complete Quadratic Combination)法<sup>[103]</sup>等も提案されている．本章の解析対象は建物とエレベータという振動特性の大きく異なるものの連成系であり，より正確な推定には非比例減衰まで取り扱える手法を用いるべきであるが，CCQC 法による推定では SRSS 法による推定に比べ約 10 倍のゲイン計算時間を必要とするため，リアルタイムの制御には向かないと考えられる．また，CQC 法による推定と SRSS 法による推定を比較したところ，両者の差は  $\beta$  の変動域の 10% 未満と小さかった．これは，ゲインの最大値が建物最上層付近の変位に掛かる変位ゲインであり，高次モードによって励起されるモードによる変位部分に掛かるゲインが極めて小さいことによる．そこで本章では，SRSS 法をベースに最大要求制御力の推定を行う．なお，本章では検討する地震動の加速度レベルが小さく，解析対象のパラメータ変動を無視できる範囲と考え，SRSS 法での最大制御力の推定を考える．SRSS 法で推定される最大応答は必ずしも各自由度で同時刻に生じるわけではない．しかし，変位ゲインの値が特に大きい自由度（建物の第 29, 30 層）では，建物内で位置が近接しているため，変位応答はほぼ同時刻に最大値となるとして問題ないと考えられる．

式(3-67)を用いて解析対象の運動方程式(3-1)を等価な非制御系として次式のように記述する．

$$M\ddot{x} + C_{eq}\dot{x} + K_{eq}x = -M1\ddot{x}_g \quad (3-69)$$

$$\mathbf{K}_{\text{eq}} = \mathbf{K} + \mathbf{f}\mathbf{G}_{\text{fd}} \quad (3-70)$$

$$\mathbf{C}_{\text{eq}} = \mathbf{C} + \mathbf{f}\mathbf{G}_{\text{fv}} \quad (3-71)$$

質量マトリクス  $\mathbf{M}$  と等価剛性マトリクス  $\mathbf{K}_{\text{eq}}$  から、 $k$  次モードについて固有円振動数  $\omega_k$  および複素固有ベクトル  $\boldsymbol{\varphi}_k$  を算出し、簡単のため非比例減衰の影響を無視してモード減衰定数  $\zeta_k$  および刺激係数  $\gamma_k$  を次式で求める。

$$\zeta_k = \frac{1}{2\omega_k} \frac{\boldsymbol{\varphi}_k^T \mathbf{C}_{\text{eq}} \boldsymbol{\varphi}_k}{\boldsymbol{\varphi}_k^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_k} \quad (3-72)$$

$$\gamma_k = \frac{\boldsymbol{\varphi}_k^T \mathbf{M} \mathbf{1}}{\boldsymbol{\varphi}_k^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_k} \quad (3-73)$$

SRSS 法による最大応答の近似は変位応答スペクトル  $S_D$  を用いて次式で表される。

$$|x_j|_{\text{max}} \approx \sqrt{\sum_{k=1}^s (\gamma_k \varphi_{kj} S_D(\zeta_k, \omega_k))^2} \quad (3-74)$$

ここで  $s$  は考慮するモード次数、 $\varphi_{kj}$  は  $\boldsymbol{\varphi}_k$  の第  $j$  成分である。コンペンロープは 1 次の振動モードだけでなく、2 次（あるいは 2 次以上<sup>[104]</sup>）まで建物と共振する可能性がある<sup>[99]</sup>。コンペンロープでは簡易計算法で 3 次モードまで考慮すればロープの最大変位を概ね誤差 +20% ~ -30% 程度以内で推定できることが示されている<sup>[99]</sup>。一方、本解析において対象としているエレベータロープはメインロープであり、これは通常 1 次の固有振動数までしか建物と共振しない<sup>[99]</sup>。Figure 3-9 より、エレベータロープが 1 次の振動モードとなるのは建物・エレベータ連成系における 2 次の振動モードまでなので、本解析においては  $s=3$  とする。これを用いて最大要求制御力  $u_{\text{exp}}$  を次式で推定する。

$$u_{\text{exp}} \approx \sqrt{\sum_{k=1}^s \left\{ \sum_{j=1}^{N_f + N_r + 1} g_{\text{fd}j} \gamma_k \varphi_{kj} S_D(\zeta_k, \omega_k) \right\}^2} \quad (3-75)$$

ここで  $g_{\text{fd}j}$  は  $\mathbf{G}_{\text{fd}}$  の第  $j$  成分である。本手法では、現在から過去  $\Delta t_{\text{rec}}$  間の地震動の加速度データから変位応答スペクトル  $S_D$  を得る。地動加速度の評価時間  $\Delta t_{\text{rec}}$  は振動が卓越すると考えられる建物の 1 次の振動モードを評価するために  $\Delta t_{\text{rec}} = 6 (> T_1)$  とする。 $\Delta t_{\text{rec}} = 6$  で切り出される加速度データから描画した変位応答スペクトルの例を Figure 3-16 に示す。ただし、区分波形の加速度が小さいとき変位応答スペクトルは小さくなるが、地震応答は過去の入力の影響も受けているため、区分波形の変位応答スペクトルから最大要求制御力を推定すると、過小評価となる可能性がある。そこで、変位応答スペクトル  $S_D(\zeta_b, T)$ （ここで、 $T \leq T_1$ ）が閾値  $S_{D\text{lim}}$  よりも小さい場合には手法 に切り替える。ただし、評価時間  $\Delta t_{\text{est}}$  を 1.0 秒とする。手法 では応答の振動の腹を評価するために固有周期との関係から  $\Delta t_{\text{est}} = 3.0$  としたが、応答が収束に向かっているときには、評価時間を長くとると応答を過大評価する可能性が大きいためである。ここで、解析対象の振動特性（固有円振動数  $\omega_k$  およびモード減衰定数  $\zeta_k$ ）は制御入力により変化する。これを反映するためには  $S_D$  を式(3-69)に示す等価非制御系に対して求めた  $\omega_k$  および  $\zeta_k$  の評価時間  $\Delta t_{\text{rec}}$  での平均に対して求めることが考

えられるが，ここでは計算時間の短縮のため，現時刻での等価非制御系に対して求めた $\omega_k$ および $\zeta_k$ を採用するものとする．また，計算の簡易化のために非制御系における値を用いることも考えられる<sup>[105]</sup>．なお，推定した最大要求制御力は安全余裕 $\rho_u$ を考え，次式を満たすように $\beta$ を更新するものとする．

$$u_{\text{exp}} \leq u_{\text{lim}} \rho_u \quad (3-76)$$

手法 で用いるパラメータを Table 3-7 に示す．

### 手法 のアルゴリズム

- Step 2-1. Step 1-1 と同じ．
- Step 2-2. Step 1-2 と同じ．
- Step 2-3. Step 1-3 と同じ．
- Step 2-4. Step 1-4 と同じ．
- Step 2-5. 現在から過去 $\Delta t_{\text{rec}}$ 間の評価時間における変位応答スペクトル $S_D$ を求める．
- Step 2-6.  $T \leq T_1$ において  $\max S_D > S_{D\text{lim}}$ の場合は Step 2-7 へ，その他の場合は Step 2-11 へ進む．
- Step 2-7. 式(3-63)より層間変形の閾値に対する余裕 $\eta_\alpha$ を求める．
- Step 2-8. 式(3-65)より $\alpha_{i+1}$  ( $\alpha_{\text{min}} \leq \alpha_{i+1} \leq \alpha_{\text{max}}$ )を求める．
- Step 2-9. 式(3-75)より最大要求制御力 $u_{\text{exp}}$ を求める．
- Step 2-10. 式(3-76)を満たす最も大きい $u_{\text{exp}}$ となる $\beta$ に更新し， $i = i + 1, I = I + 1$ として Step 2-2 へ戻る．
- Step 2-11. Step 1-5 と同じ．
- Step 2-12. Step 1-6 と同じ．

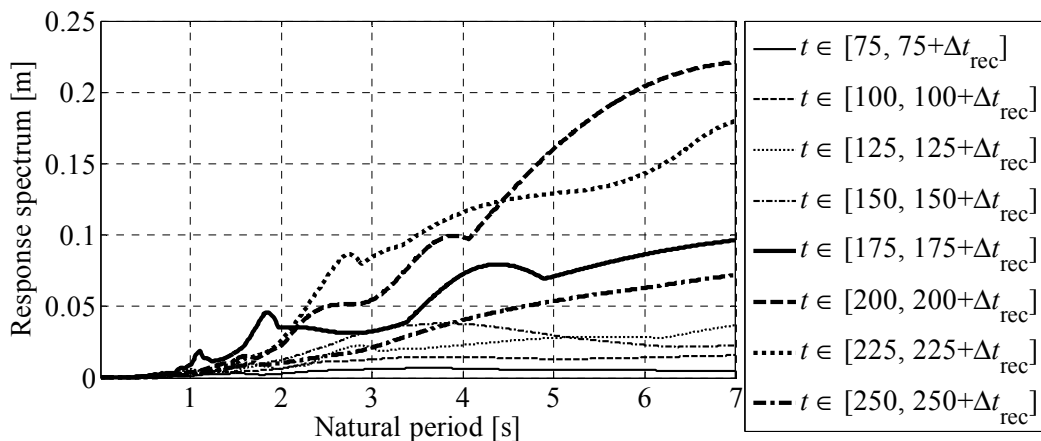


Figure 3-16 Displacement response spectra (Damping factor 0.01).  
(KiK-net record of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake)



Table 3-7 Parameters for Algorithm

Parameter	Symbol	Value	Unit
Time step of analysis	$\Delta t$	0.005	s
Threshold value for switching control objectives	$x_{thr}$	$h \times 10^{-3}$	m
Capacity of control force	$u_{lim}$	$5 \times 10^5$	N
The initial value of $\alpha$	$\alpha_{ini}$	0.000	—
The initial value of $\beta$	$\beta_{ini}$	0.500	—
Updating weight of $\alpha$	$\Delta\alpha$	0.002	—
Updating weight of $\beta$	$\Delta\beta$	0.001	—
Updating interval	$\Delta t_{up}$	0.1	s
Evaluating time of responses and control force	$\Delta t_{est}$	1.0	s
Evaluating time of ground acceleration	$\Delta t_{rec}$	6.0	s
Threshold value for switching method	$S_{Dlim}$	0.1	m
Number of considered modes	$s$	3	—
Safety factor for control force	$\rho_u$	0.9	—

### 3.5. 検証解析

検証解析を長周期地震動の観測記録，建設省告示の加速度応答スペクトルをもつ地震動（告示波），標準 3 波（El Centro 1940 NS，Taft 1952 EW，Hachinohe 1968 NS）<sup>[106]</sup>について行った．長周期地震動の観測記録としてはエレベータに関する被害が発生した事例を参考に 2004 年新潟県中越地震 K-NET 新宿観測記録 EW 成分，2011 年東北地方太平洋沖地震 KiK-net 大阪地表観測記録 NS 成分の原波を採用した．告示波は解放工学的基盤における稀に起こる地震動とし，位相スペクトルは Hachinohe 1968 NS および JMA Kobe 1995 NS を採用した．また，標準 3 波の加速度記録は最大速度が 25 cm/s となるようにスケーリングを行った．Figure 3-17 に用いた地震動についてパワースペクトル密度が最大となる振動数（中心周波数）と最大加速度の分布を示す．なお，これらの地震動は非制御時の建物応答で最大層間変形角が 1/200 rad を超過しないことから線形弾性応答の仮定に問題がないことを確認している．また，解析時間は地震動の継続時間の 2 倍とした．

解析結果の一例として，エレベータロープの振動が顕著となる長周期地震動の 2011 年東北地方太平洋沖地震 KiK-net 大阪地表観測記録 NS 成分に対する解析結果（変位ゲイン（ $j$  は自由度で，最上層は  $j = 30$ ），制御力，制御目的重み，層間変形角の絶対値の最大値，建物とロープの相対距離の絶対値の最大値）を Figure 3-18, Figure 3-19 に示す．ここで Figure 3-18 および Figure 3-19 の d) 最大層間変形角については各時刻における建物の全層における絶対値の最大値を，e) 最大建物-ロープ間距離については各時刻における全ロープ自由度の場所における絶対値の最大値をそれぞれ示している．なお，Figure 3-19 については可変パラメータ  $\beta$  を一定とした場合の結果も併せて示す．Figure 3-18, Figure 3-19 の d), e) より，手法 ，ともに  $\beta$  を一定とした場合に比べて応答の収束が早くなっていることが分かる．以下に手法 ，それぞれの解析結果を考察する．

### ・手法 Ⅰ の傾向

Figure 3-18 b), c)より, ゲインがほぼ零となり, 制御入力ほぼ零となる状態の発生が目立ち, 装置能力を十分に使用できていないといえる. 一方で飽和している時間の長い解析結果が多くあった. 手法 Ⅰ では, 制御力の余裕 $\eta_\beta$ に更新重み $\Delta\beta$ を掛けることで制御力に関する重み $R(\beta)$ を更新している. したがって,  $\eta_\beta$ と $\Delta\beta$ の改善が制御性能の改善に繋がる. 制御力の余裕 $\eta_\beta$ は, 評価時間 $\Delta t_{est}$ によって精度が変化する. しかし解析の結果では, 制御力がほぼ零の状態と飽和状態の両方の継続時間が長くなっており, すなわち応答の過大評価と過小評価の両方を起こしているため, 評価時間 $\Delta t_{est}$ の変更による改善は期待できない. 一方, 急激に制御力がほぼ零の状態や飽和状態に陥らないように,  $\Delta\beta$ を小さな値へ変更した場合, 変化の大きい地震動に対応できなくなり, また逆に, 速応性を重視し $\Delta\beta$ を大きな値へ変更した場合, 制御力がほぼ零の状態や飽和状態の発生が多くなり, 不安定な制御となるため, 応答の改善には繋がらない. したがって, 手法 Ⅰ では地震動の特性に大きくその制御性能を左右されるといえる. 一方, Figure 3-18 a)より, 制御目的の重みは滑らかに変化しており, 振動が収まるにつれてエレベータの振動抑制を重視した制御へと切り換わっていることが確認できる.

### ・手法 Ⅱ の傾向

Figure 3-19 b)より, 手法 Ⅱ で変位ゲインがほぼ零となっていた時刻でも変位ゲインが比較的大きな値となっていることが確認できる. 地震動によっては装置能力の飽和が生じたが, 比較的良く応答を抑制できた. Figure 3-19 c)より, 応答の大きい場合でもゲインを抑え装置能力を十分に使用して制御を行えているといえる. パラメータ $\rho_u$ で推定最大要求制御力が装置能力の90%以内となるように重み $R$ を与えたが, 装置能力の飽和を生じた. その理由は評価時間 $\Delta t_{rec}$ の期間より前の時刻に入力された地震動のエネルギーが評価できておらず制御力が小さく評価されたためと考えられる. Figure 3-20に制御力の指令値を示す. これより, Figure 3-19 b)において200秒あたりにスパイク状のゲインが発生していたことにより, 大きな制御力の指令が与えられたことがわかる. このような制御力の発生による制御の不安定性の議論が今後必要と考えられる. また, Figure 3-19 a)において0近傍の値をとるとき, すなわちエレベータの振動抑制を重視した制御を行っているときに平均的に装置能力を超過していることがわかる. これは最大制御力の推定において考慮次数 $s=3$ としたため, エレベータが高次で振動することによる推定制度の低下が考えられる. また, Figure 3-19 a)より, 制御目的に関する重みについては, Figure 3-18 d), Figure 3-19 d)に示すように手法 Ⅱ では手法 Ⅰ に比べ建物応答の収束が速いため, エレベータの振動抑制を重視した制御への切り換わりも早くなっている.

### ・応答低減効果の比較

両手法における応答率を次式で定義する.

最大値の応答率:

$$r_{\max} = \frac{\text{The average of controlled maximum response in height direction}}{\text{The average of uncontrolled maximum response in height direction}} \quad (3-77)$$

RMS 値 (評価時間: 継続時間の2倍) の応答率:

$$r_{\text{RMS}} = \frac{\text{The average of controlled RMS value in height direction}}{\text{The average of uncontrolled RMS value in height direction}} \quad (3-78)$$

地震動ごとの応答率を Table 3-8 に示す．Table 3-8 より，手法 の方が手法 と比較して，7 波中 6 波で最大応答をよく低減できている．手法 で Hachinohe 1968 NS を入力した際，5 %程度の悪化が見られたが，これは入力地震動のパワースペクトルのピークと制御することによって変化する等価な非制御系の固有振動数が偶然重なったためと考えられる．

また，Table 3-8 において RMS 値を比較すると，手法 は手法 よりも応答率が低く，低減効果が高いことが確認できる．これより，減衰性能が提案手法により改善されたといえる．

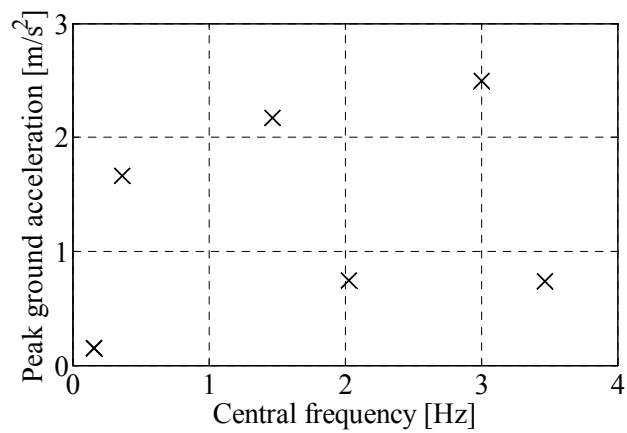
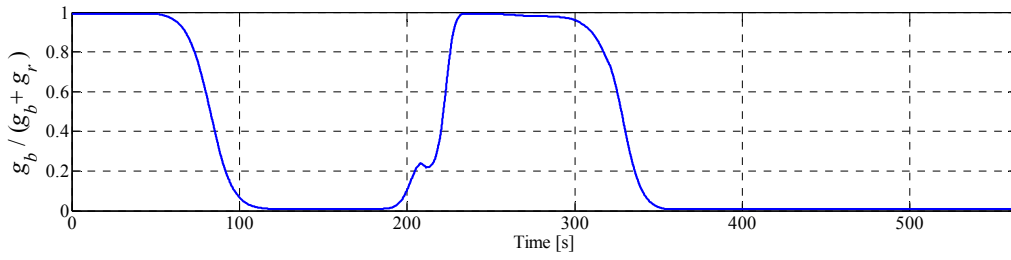
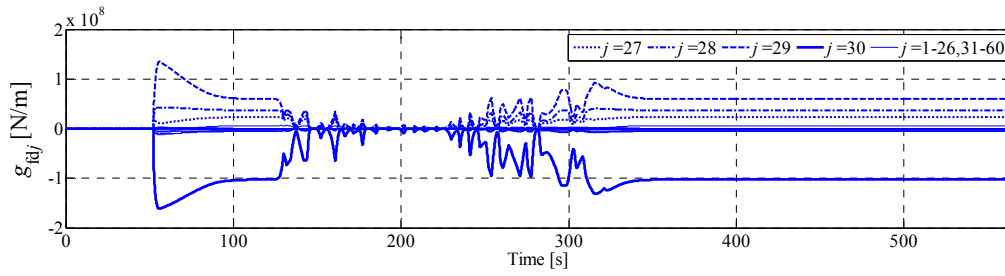


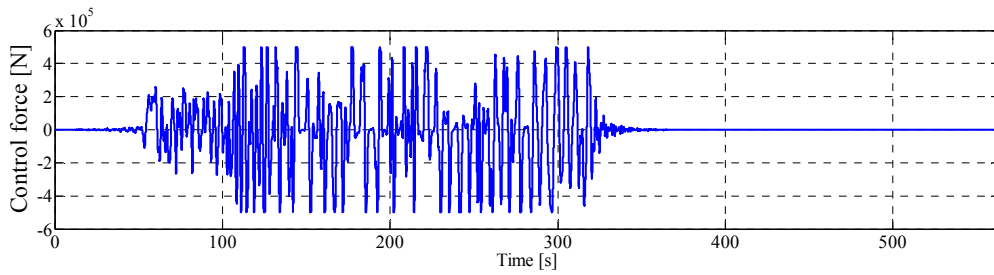
Figure 3-17 Central frequency and peak acceleration of ground motion.



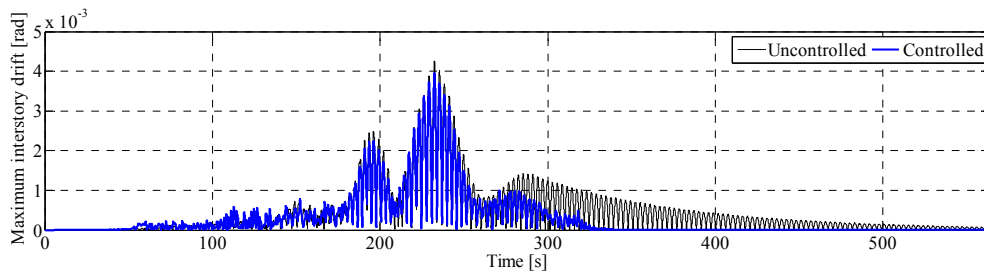
a) Weighting function.



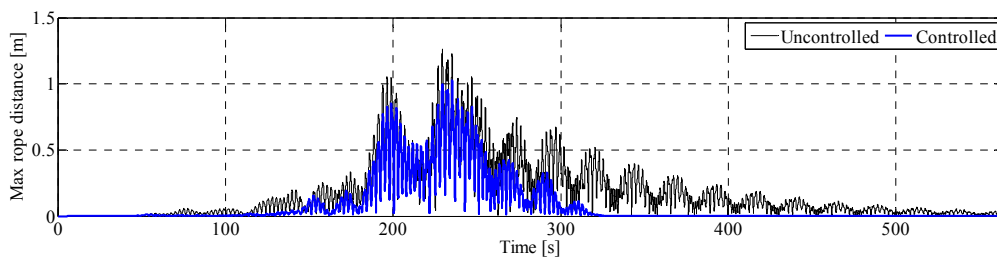
b) Displacement gains.



c) Control force.

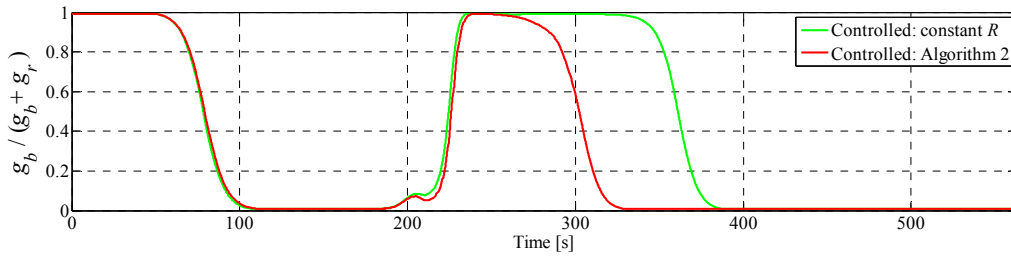


d) Maximum response of interstory drift.

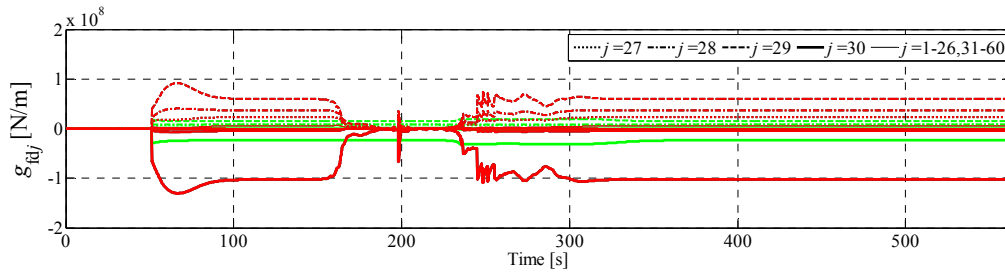


e) Maximum response of distance between building and elevator rope.

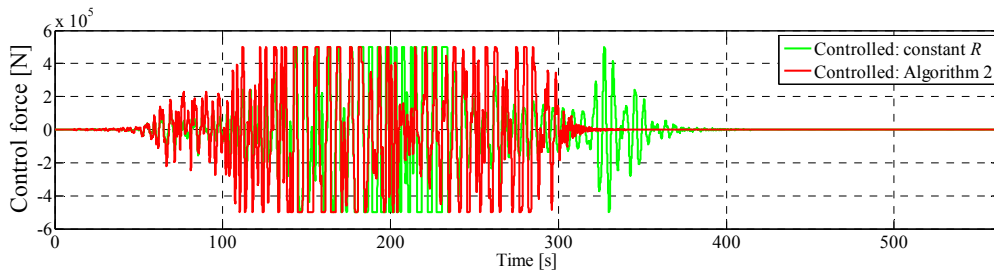
Figure 3-18 Time-history responses: Algorithm . . .  
(KiK-net record of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake)



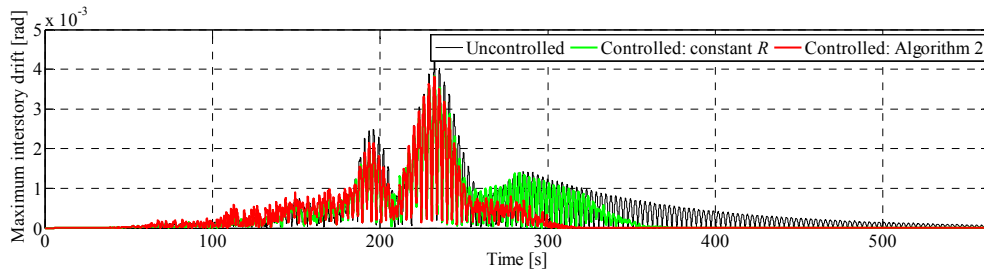
a) Weighting function.



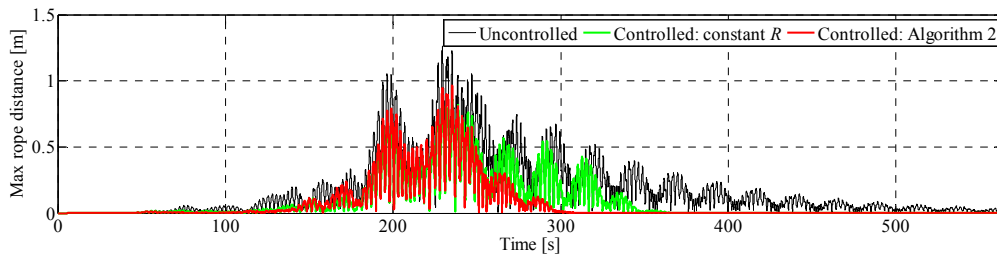
b) Displacement gains.



c) Control force.



d) Maximum response of interstory drift.



e) Maximum response of distance between building and elevator rope.

Figure 3-19 Time-history responses: Algorithm 2 (KiK-net record of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake)

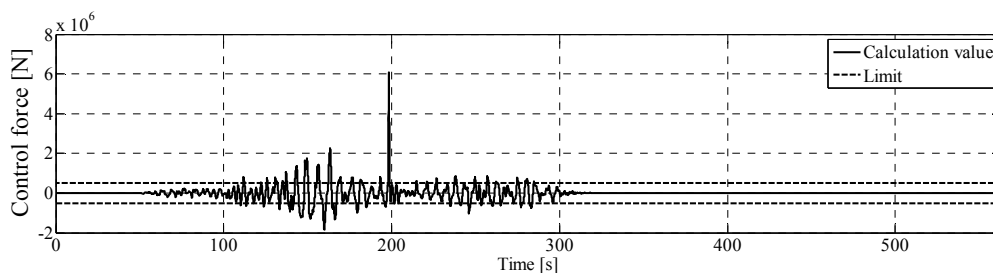


Figure 3-20 Calculation value of control force.

Table 3-8 Response ratios of maximum responses and RMS values.

Wave	Response	Response ratio [%]			
		Algorithm		Algorithm	
		Max	RMS	Max	RMS
Design ground motion (Phase: Hachinohe 1968 NS)	Absolute acc.	82.4	70.7	61.3	45.7
	Interstory drift	84.8	72.6	69.7	48.6
	Rope distance	84.9	72.1	62.0	46.2
Design ground motion (Phase: JMA Kobe 1995 NS)	Absolute acc.	91.3	66.0	78.5	50.9
	Interstory drift	93.9	69.4	81.7	54.5
	Rope distance	95.7	66.9	73.1	44.3
El Centro 1940 NS	Absolute acc.	90.9	78.1	87.9	71.1
	Interstory drift	96.0	82.0	92.1	75.5
	Rope distance	91.7	82.4	84.9	72.4
Taft 1952 EW	Absolute acc.	99.8	86.3	91.1	74.1
	Interstory drift	99.5	88.5	91.5	77.2
	Rope distance	95.4	85.1	79.5	69.4
Hachinohe 1968 NS	Absolute acc.	90.7	80.6	93.1	76.1
	Interstory drift	96.5	87.9	101.4	87.1
	Rope distance	98.7	82.2	105.5	84.0
K-NET Shinjuku 2004 EW	Absolute acc.	74.0	46.4	73.1	44.2
	Interstory drift	76.3	47.5	74.8	45.9
	Rope distance	68.5	44.8	67.9	42.5
KiK-net Osaka 2011 NS	Absolute acc.	93.4	84.3	88.8	78.6
	Interstory drift	95.6	85.2	90.3	79.8
	Rope distance	81.5	71.7	76.8	63.8

### 3.6. 結言

本章では建物や設備機器の応答の早期収束を目標とし、装置能力を効果的に使う制御アルゴリズムの提案として、地震動強度と建物応答レベルの時間変化に順応する周波数整形と可変ゲインフィードバック制御に基づいた制御手法を提案し、有効性を検証した。得ら

れた知見を以下に示す．

- 制御目的を時変とすることにより，効率の良い応答低減を実現した．
- 既往研究を拡張した建物応答の閾値に対する余裕および制御力の装置能力に対する余裕からフィードバックゲインを更新する手法（手法 ）では，地震動によっては制御力重みの変化が過敏となり，制御力がほぼ零となる状態の発生が目立った．
- 本章で提案した建物応答の閾値に対する余裕と最大要求制御力の推定からフィードバックゲインを更新する手法（手法 ）では，フィードバックゲインを適切な大きさに変化させることにより，装置能力の飽和による応答の悪化を防ぎつつ，連続的に制御を行い，応答を効果的に低減することができた．
- RMS 値の評価より，提案手法によって減衰性能を向上でき，建物機能継続の観点から早期復旧を実現できることを示した．

なお，本手法はパラメータを変更することにより，他の建物・(建物内)設備連成系への適用が可能となる．

今後の課題として，フィードバックゲイン切り替え時の理論的な安定性についての検証が挙げられる．また，制御の実装に向け計算コストを低減し，タイムラグやモデル化誤差を考慮したロバストでリアルタイム性を有した制御則とすることが挙げられる．

### 3.7. 謝辞

本章の解析には防災科学技術研究所 K-NET および KiK-net の地震観測記録を用いた．記して謝意を表す．

## 第4章 継続稼働に向けたエネルギー最適制御理論 の建築分野における設計指針



## 4.1. 緒言

本章では建物機能継続のための評価項目(3)継続稼働を目的として、エネルギー最適制御<sup>[74], [107], [108]</sup>の評価関数の設計から、単位エネルギーあたりの最大応答の低減率の向上を達成する。地震動によって励起される振動を制御する建築分野の振動制御の例として、建物内に設置された免震床を対象とし、制御設計方法を示し、その有効性を検証する。エネルギー最適制御の評価関数は低減させたいパワーの項、最適レギュレータの制御量項に相当する項、アクチュエータが制御対象に加えるパワーの項から構成される。本章では低減させたいパワーとして散逸パワーを評価することにより、熱として消費されるエネルギーを有効に回生できることを示す。また、他の制御手法（最適レギュレータ）においてエネルギーを考慮した設計を行う方法を示す。そして、エネルギー最適制御による提案手法と制御性能、消費エネルギー、および設計の容易さ（見通しの良さ）の面から比較を行い、提案手法の有用性の検証を行う。

## 4.2. エネルギー最適制御の定式化

一般的な多自由度のシステムの運動方程式は次のように表せる。

$$\ddot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} + \mathbf{d}^T \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{e}^T = \mathbf{u}^T \quad (4-1)$$

ここで、 $\mathbf{q}$  は一般化座標の変位ベクトル、 $\mathbf{M}$  は質量行列、 $\mathbf{d}$  はダンピングカベクトル、 $\mathbf{e}$  はポテンシャルカベクトル、 $\mathbf{u}$  は制御カベクトルである。このシステムに対して、福島ら<sup>[74]</sup>の方法を参考にエネルギー最適制御問題の定式化を行う。全入出力パワーの収支の式（運動方程式(4-1)に右から $\dot{\mathbf{q}}$ を乗じたもの）は次式となる。

$$\mathbf{u}^T \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{d}^T \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (4-2)$$

ここで、重み係数 $\kappa$ と $r$ を用いて次式で表されるスカラー評価関数 $J$ <sup>[107]</sup>を設定する。

$$J = \int L dt \quad (4-3)$$

$$L = \kappa P + g + r \mathbf{u}^T \dot{\mathbf{q}} \quad (4-4)$$

評価関数 $J$ の被積分関数 $L$ の第1項 $P$ の設定方法については、福島らによりエネルギー収支式(4-2)を用いる方法<sup>[74]</sup>や系の散逸パワーを用いる方法<sup>[107]</sup>等が提案されているが、その設定方法について明確な指針はない。本章では建築分野の振動制御にエネルギー最適制御を適用する場合の、評価関数の設定方法についての指針を示す。 $P$ の設定について、福島ら<sup>[107]</sup>は、発熱の抑制を目的として散逸パワー（式(4-2)の第3項）を $P$ に設定している。しかし、建築分野におけるパッシブな制振では、この散逸パワーを大きくとることにより、構造の損傷エネルギーの低減を図っているため、建物や免震床を制御対象とする場合、散逸パワーがシステムの不安定化に寄与するとは考えづらい。逆に、散逸エネルギーは減衰要素の破壊を伴わないので、パッシブ制御においては、この項の値は積極的に大きくすることが望ましいと考えられる。しかし、本章で扱うアクティブ制御においては、回生電力に

よって発熱として消費されるエネルギーを減らし，回生電力によって回生エネルギーを得ることを目的とするために， $L$  の第 1 項  $P$  には制御対象の散逸パワー式を設定することとする．制御対象の散逸パワー式は文献[107]では式(4-5)の形をとっているが，建築分野の振動を考える場合，散逸パワーは相対速度を用いて式(4-6)の形となる．

$$P = \mathbf{d}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \quad (4-5)$$

$$P = \mathbf{d}^T(\dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_z) \{\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_z\} \quad (4-6)$$

ここで  $\mathbf{q}_z$  は変位入力の外乱ベクトル（地震動を考える場合，地表変位といった基準変位がこれにあたる）である．また， $L$  の第 2 項  $g$  は制御性能の評価式を表しており，最適レギュレータと同様に制御目的の 2 次形式として設定する．建築分野の振動制御においては，制御性能として絶対加速度，相対速度，相対変位を評価することが多い．そのため，評価式は  $g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_z, \dot{\mathbf{q}}_z)$  と表す．そして，エネルギー回生を陽に考慮するために  $L$  の第 3 項にはアクチュエータが制御対象に加えるパワーを評価する項  $\mathbf{u}^T \dot{\mathbf{q}}$  が導入されている．ここで，例えば自動車の上下振動を考える場合には，路面の上下方向の速度は 0 と考えられるため  $\mathbf{u}^T \dot{\mathbf{q}}$  でアクチュエータが制御対象に加えるパワーを評価することができるが，建築分野の特に水平方向の振動を考える場合，アクチュエータが制御対象に加えるパワーはアクチュエータの両端の速度を考える必要がある．そこで式(4-4)を次のように書き換える．

$$L = \kappa P + g + r \mathbf{u}^T \{\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_z\} \quad (4-7)$$

このとき式(4-3), (4-6), (4-7)より評価関数を整理すると次式が得られる．

$$J = \int \left[ \kappa \mathbf{d}^T(\dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_z) \{\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_z\} + g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_z, \dot{\mathbf{q}}_z) + r \mathbf{u}^T \{\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_z\} \right] dt \quad (4-8)$$

評価関数の構成については，4.3.2 項においてより詳細に検討する．

Euler-Poisson の方程式より， $J$  が極値をもつ必要条件是次式となる<sup>[109]</sup>．

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{\partial L}{\partial \ddot{\mathbf{q}}} \right) = \mathbf{0} \quad (4-9)$$

ここで，建築分野の振動制御について記述した式(4-8)で表される評価関数の場合， $L$  は  $\mathbf{u}$  に関して 1 次式であるので，式(4-9)に制御に関するすべての情報が含まれる<sup>[74]</sup>．次に，式(4-9)を  $t$  に関して積分すると式(4-10)が得られる．ただし，積分定数はゼロとする<sup>[108]</sup>．

$$\int \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} dt - \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} + \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \ddot{\mathbf{q}}} \right) = \mathbf{0} \quad (4-10)$$

式(4-10)を  $\mathbf{u}$  について解くことにより，次の制御則が求まる．

$$\mathbf{u} = \frac{1}{r} \left[ -\kappa \frac{\partial(\mathbf{d}^T(\dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_z) \{\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_z\})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} + \int \left\{ \frac{\partial g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_z, \dot{\mathbf{q}}_z)}{\partial \mathbf{q}} dt - \frac{\partial g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_z, \dot{\mathbf{q}}_z)}{\partial \dot{\mathbf{q}}} + \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_z, \dot{\mathbf{q}}_z)}{\partial \ddot{\mathbf{q}}} \right\} \right] \right] \quad (4-11)$$

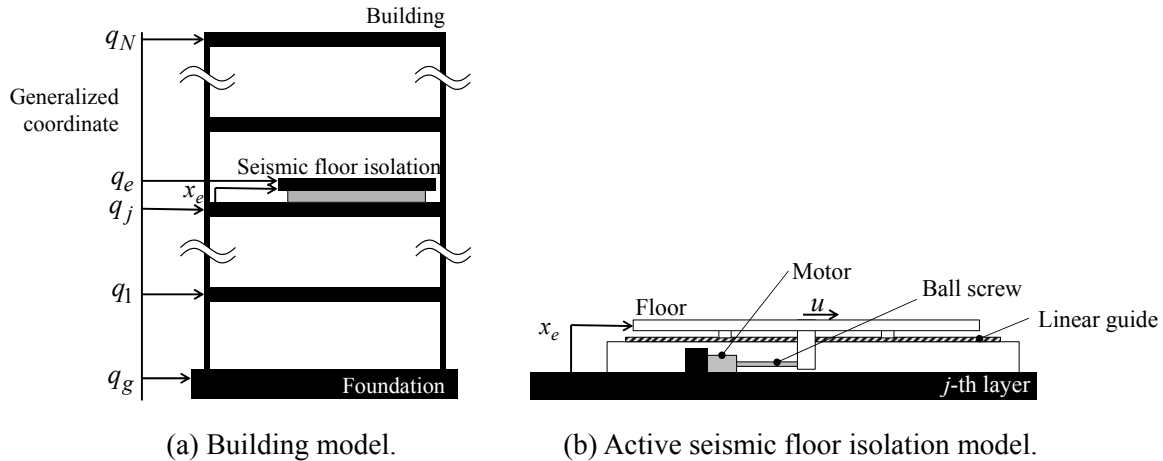


Figure 4-1 Analysis model.

ここで、このような連続的な制御入力の実現方法については Nakano et al.<sup>[110]</sup>によって提案・実証がなされている。

### 4.3. 検証解析

#### 4.3.1. 制御系設計モデル

エネルギー回生を利用した制御（セルフパワード・アクティブ制御）には、1 つのアクチュエータがエネルギー回生とアクティブ制御の両方を行う方式（単一型）と、エネルギー回生とアクティブ制御を別々のアクチュエータによって行う方式（複合型）が考えられる<sup>[111]</sup>。本章では単一型のセルフパワード・アクティブ制御を考え、Figure 4-1 に示すような建物の  $j$  層に設置されたアクティブ免震床（免震床とその上部に設置された設備機器等）を制御対象とする。なお、設備機器として本章ではサーバを考えており、免震床上にサーバは均等に配置されているものと仮定する。偏心がほとんど無い場合、ねじれ振動は並進振動に比べて卓越しないと考えられるので、ここでは免震床を 1 自由度系として扱う。今後、対象をシステムフロアに使用する免震床等に拡張する場合には、偏心の影響が生じる可能性があるため、2 自由度系で設計する必要がある。なお、本章では制御系設計モデルと検証モデルに対して本項で述べるモデル化における仮定が成り立つものと考え、ともに線形モデルを用いる。いま、免震床上面およびその上に設置された設備機器等の質量の和を  $m_e$ 、免震床の減衰係数および剛性係数をそれぞれ  $c_e$ 、 $k_e$  とし、免震床を 1 自由度のせん断質点モデルとして扱うものとする、建物  $j$  層の床応答加速度  $\ddot{q}_j$  を受けるアクティブ免震床の運動方程式は次式となる。

$$m_e \ddot{x}_e + c_e \dot{x}_e + k_e x_e = -m_e \ddot{q}_j + u_e \quad (4-12)$$

ここで  $x_e$  は免震床の設置床面（建物  $j$  層床面）からの相対変位、 $q_j$  は建物  $j$  層の絶対変位、 $u_e$  は免震床に入力される制御力である。免震床モデルのパラメータを Table 4-1 に、建物モデルのパラメータを Table 4-2 に示す。本章では、建物モデルは免震床への入力外乱を算出するためのみに用いることとし、建物の運動方程式中には設備の応答を記述しない。免震床の剛性の非線形性は等価線形モデルにより線形として扱えるものとし、線形弾性を仮定

する．なお，等価線形モデルの設定については，被害発生確率の評価を非線形モデルと等価とするモデル<sup>[112]</sup>の使用が考えられる．また，建物の  $n$  層の層剛性  $k_{bn}$  の分布は  $A_i$  分布により与え，線形弾性を仮定する．建物の減衰は剛性比例型とし，建物の  $n$  層のダンパの減衰係数  $c_{bn}$  を建物の 1 次固有周期  $T_{b1}$  と建物の減衰定数  $\zeta_b$  を用いて次式で与える．

$$c_{bn} = \frac{\zeta_b T_{b1}}{\pi} k_{bn} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (4-13)$$

なお，建物の応答は検討する全ての地震動に対して最大層間変形角で 1/200 rad 以内となっており，線形弾性の仮定が成立することを確認している．

#### 4.3.2. 制御設計

ここではエネルギー最適制御（EO 制御：Energy optimal control）について，免震床の絶対加速度と免震床の相対変位の双方の応答低減を目的とする制御を考える．なお，速度項の重みを適切に設定することで絶対加速度を抑えることもできると考えられるが，本章では陽に絶対加速度を考えることのできる立式とする．

制御性能の評価式は次のような 2 次形式で記述できる．

$$g(q_e, \dot{q}_e, q_j) = Q_d (q_e - q_j)^2 + Q_a \dot{q}_e^2 \quad (4-14)$$

ここで， $Q$  は重み係数であり，添え字  $d$  は免震床の相対変位に関する重みを， $a$  は免震床

Table 4-1 Physical parameters of seismic floor isolation model.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Mass of the seismic floor isolation and equipment	$m_e$	$5 \times 10^2$	kg
Stiffness	$k_e$	$4.0 \times 10^3$	N/m
Damping coefficient	$c_e$	$5.7 \times 10^2$	N/(m/s)
Fundamental period <sup>[113]</sup>	$T_e$	1/0.45	s
Damping factor <sup>[113]</sup>	$\zeta_e$	0.20	—
Position of the seismic floor isolation	$j$	4	—

Table 4-2 Physical parameters of building model.

#### (a) Physical parameters.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Mass of each story	—	$1 \times 10^4$	kg
Fundamental period	$T_{b1}$	0.8	s
Layer height	—	4	m
Damping factor	$\zeta_b$	0.02	—
Number of layers of the building	$N$	10	—

#### (b) Stiffness.

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
[ $10^6$ N/m]	33.9	32.7	31.2	29.3	27.0	24.2	21.1	17.5	13.3	8.3

の絶対加速度に関する重みを示している．このとき， $\mathbf{d} = c_e(\dot{q}_e - \dot{q}_j)$ ， $\mathbf{u} = u_e$ ， $\mathbf{q} = q_e$ であることを用いると評価関数（式(4-8)）は次のように表される．

$$J = \int \left[ \kappa c_e (\dot{q}_e - \dot{q}_j)^2 + \left\{ Q_d (q_e - q_j)^2 + Q_a \dot{q}_e^2 \right\} + r u_e (\dot{q}_e - \dot{q}_j) \right] dt \quad (4-15)$$

続いて，制御目的間のバランスをとるために，第 2 章で示した操作<sup>[98]</sup>を施す．なお，無次元化に用いる参照最大応答は，検討に用いる入力波レベルでの非制御時の最大応答の平均とし，変位応答  $\bar{r}_d$  で 0.0436 m，絶対加速度応答  $\bar{r}_a$  で 0.426 m/s<sup>2</sup> である．ただし，計算上桁落ちが生じるため，ここでは各パラメータを 10 倍したものを無次元化に用いるものとする．式(4-11)に式(4-14)を代入して整理することにより，制御力は式(4-16)で与えられる．ただし，1 質点の免震床のモデルにおいては， $\mathbf{q}_z = q_j$ ， $\mathbf{M} = m_e$ ， $\mathbf{e} = k_e(q_e - q_j)$  である．

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \frac{2}{r} \left[ -\kappa c_e (\dot{q}_e - \dot{q}_j) + Q_d \int (q_e - q_j) dt + Q_a \frac{d}{dt} \dot{q}_e \right] \\ &= \frac{2}{r} \left[ -\kappa c_e \dot{x}_e + Q_d \int x_e dt + Q_a \frac{d}{dt} (\ddot{x}_e + \dot{q}_j) \right] \end{aligned} \quad (4-16)$$

$$Q_d = \frac{1}{(\bar{r}_d \times 10)^2} \quad (4-17)$$

$$Q_a = \frac{1}{(\bar{r}_a \times 10)^2} \quad (4-18)$$

ここで， $r$  を小さくする，あるいは  $\kappa$  を大きくすることで散逸エネルギーを抑え，そのエネルギーを回生する効果が大きくなると考えられる．本章では  $r=1$  とし， $\kappa$  を変動させることにより性能の評価を行うものとする．なお，本章では免震床モデルは線形を仮定しているため，入力外乱の振幅レベルを定数倍にした場合においても，評価関数内の制御目的に関する項の構成比は変化しない．そのため，入力外乱の大きさを変えた場合の問題は，制御力の飽和に絞られる．飽和に関しては本章では扱わないが，第 3 章で示した可変ゲインを用いる方法により，飽和に対しても対応できるものとする．したがって，入力外乱の振幅レベルが異なる場合についても，応答を線形として扱える，または線形化して扱える範囲の入力に対しては本指針で対応できる．

#### 4.3.3. 解析結果

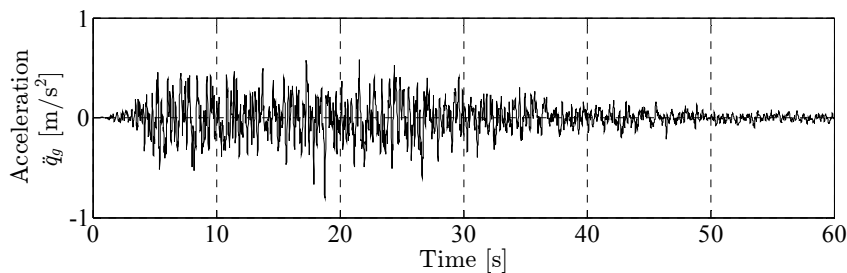
数値解析には線形加速度法を用いた．本章では平成 12 年建設省告示第 1461 号の稀に起こる地震動の加速度応答スペクトルをもつ地震動  $\ddot{q}_g$ （告示波）を建物モデルに入力し，その応答波（建物  $j$  層の絶対加速度応答）を入力外乱  $\dot{q}_j$  とする解析を行った．告示波は位相をランダムとし，100 波について解析を行った．告示波のサンプルの波形と，その際の建物  $j$  層の応答波（ $j=4$ ）を Figure 4-2 に示す．

応答波を入力した際のアクチュエータが制御対象に加えたパワー  $\mathbf{u}^T \{\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_z\} = u_e(\dot{q}_e - \dot{q}_j)$  が負となる領域（エネルギー回生領域：Energy regeneration area）と  $(\dot{q}_e - \dot{q}_j) - u_e$  の軌跡の関係，エネルギー消費（回生率を 100% と仮定），制御力，絶対加速度応答，変位応答の時刻歴を Figure 4-3 に示す．ここでは，重み係数  $\kappa=1$  のときを示している．

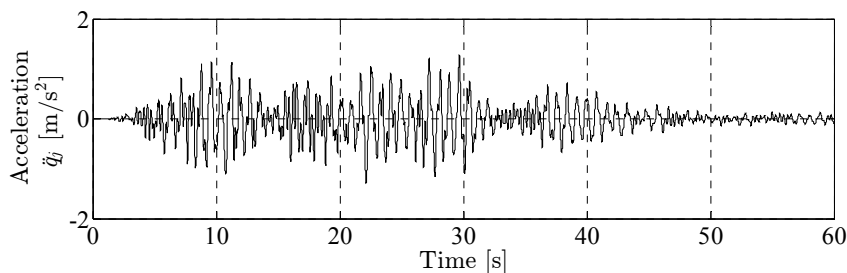
Figure 4-3 (a)より  $(\dot{q}_e - \dot{q}_j) - u_e$  の軌跡はおおよそエネルギー回生領域のみを通過する形状となっており, Figure 4-3 (b)に示した値より,  $(\dot{q}_e - \dot{q}_j) - u_e$  の軌跡がエネルギー回生領域を通る頻度が高く, エネルギー消費量が少ないことが確認できる. また, Figure 4-3 (c)より 200 N 程度の制御力となっていることが確認できる. なお, 免震床に対する入力外乱の大きさと制御力の関係は 既往研究<sup>[113]</sup>において入力加速度  $0.74 \text{ m/s}^2$  に対して制御力 223 N となっている. そのため, 建物応答波の最大加速度約  $1 \text{ m/s}^2$  に対して制御力 200 N 程度の想定は妥当な範囲と考えられる.

応答の低減効果について, Figure 4-3 (d)より, 絶対加速度に関しては非制御時と比較して応答が大きい. 参照最大応答の設定により, 絶対加速度の低減をより重視する方向へ制御設計の方針を変更することは可能<sup>[98]</sup>であるが, ここでは Figure 4-2 (b)に示す設置床の絶対加速度と Figure 4-3 (d)に示す免震床上面での応答加速度を比較すると十分に小さくなっているため, 4.3.2 項で設計したケースについて議論するものとする.

次に 設計変数  $\kappa$  を変化させた場合について示す 重み係数  $\kappa$  を変化させることにより, 制御ゲインが変化し, 制御性能と消費エネルギーもそれに伴い変動する. その様子を Figure 4-4 に示す. まず Figure 4-4 (a) より,  $\kappa$  を変化させることで  $(\dot{q}_e - \dot{q}_j) - u_e$  の軌跡の傾きが変わることがわかる. 傾きが大きくなるに従い, 制御力の絶対値の最大値が大きくなる. また, Figure 4-4 (b)より,  $\kappa = 3.59$  あたりまでは消費エネルギーが低減する方向へ変化していることがわかる. 応答については, Figure 4-4 (a)の傾きが小さくなる (負の値で大きくなる) に従い, Figure 4-4 (c)より絶対加速度応答が増加し, Figure 4-4 (d)より相対変位応答が減少する傾向が確認できる. これは, Figure 4-4 (a)の傾きの絶対値が減衰係数に相当し, 減衰が小さい場合には加速度の低減性能が優れ, 減衰が大きい場合には変位の低減性能が優れることと一致する.

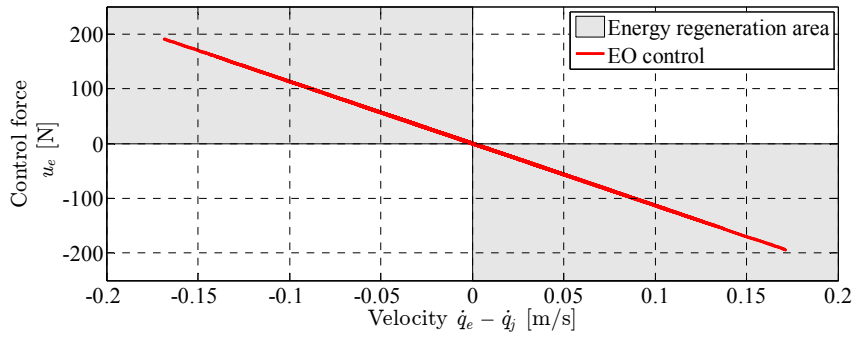


(a) Ground acceleration.

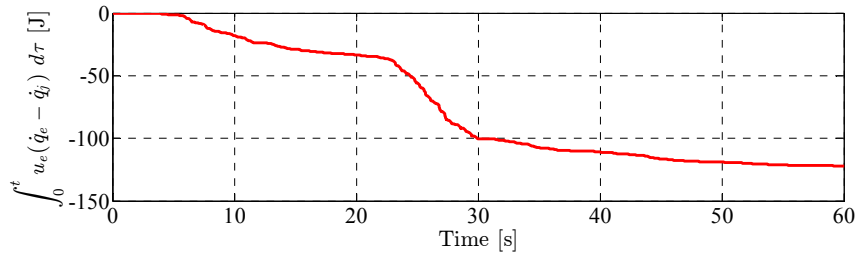


(b) Response acceleration. ( $j = 4$ )

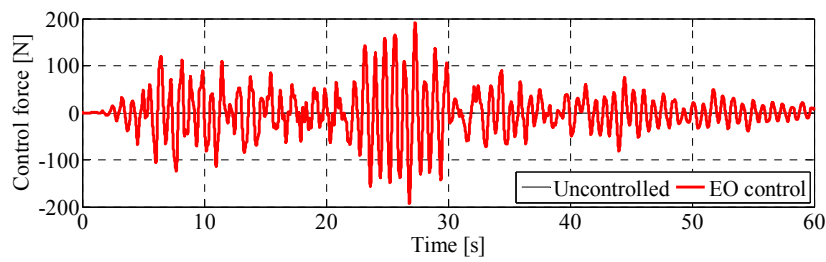
Figure 4-2 Input waves.



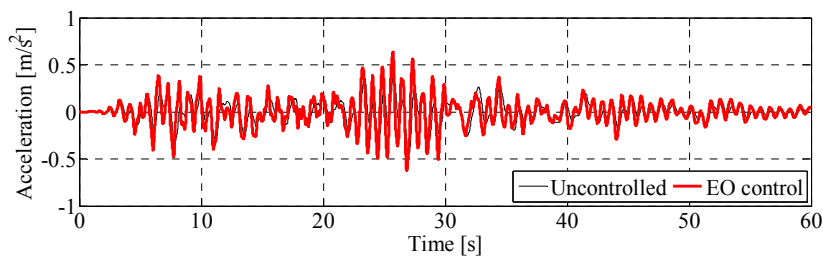
(a)  $(\dot{q}_e - \dot{q}_j) - u_e$  locus.



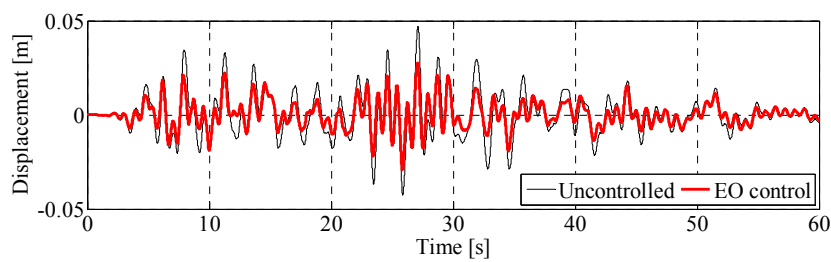
(b) Energy consumption.



(c) Control force.

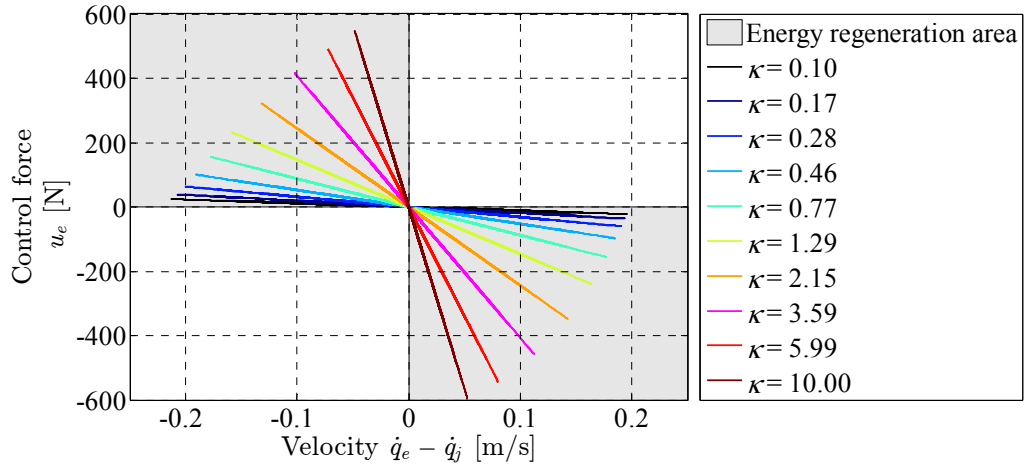


(d) Absolute acceleration response.

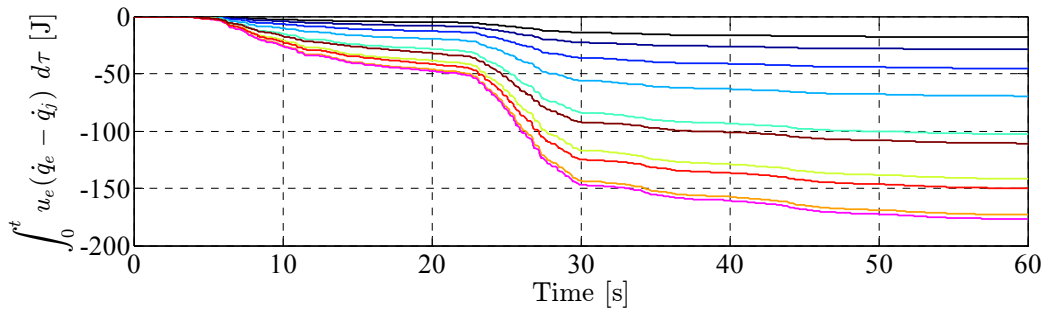


(e) Displacement response.

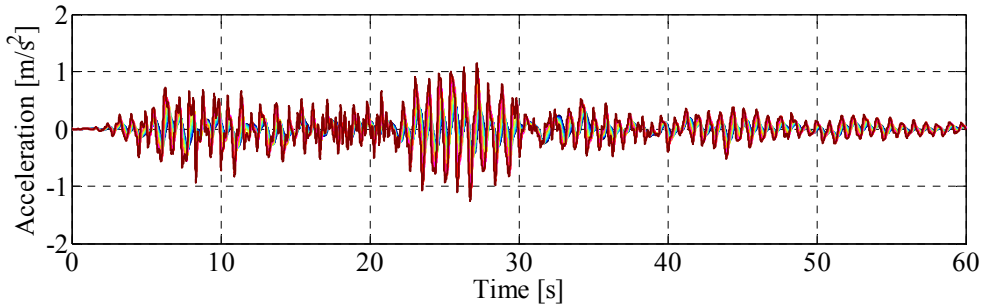
Figure 4-3 Time history ( $\kappa = 1$ , Input: Response wave).



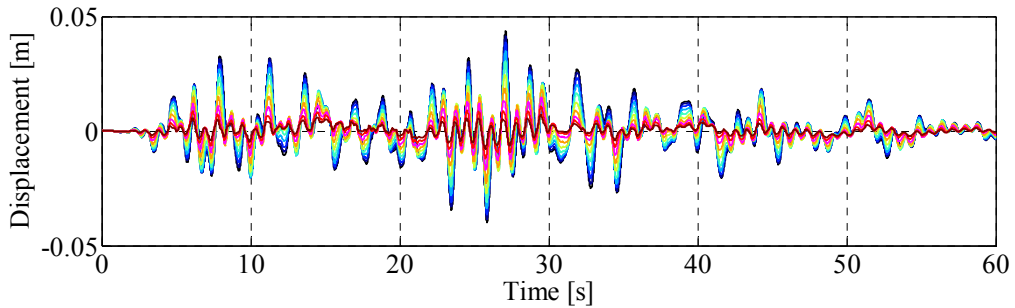
(a)  $(\dot{q}_e - \dot{q}_j) - u_e$  locus.



(b) Energy consumption.



(c) Absolute acceleration response.



(d) Displacement response.

Figure 4-4 Time history ( $\kappa = 0.1 \sim 10$ , Input: Response wave).



一方,最適レギュレータを用いた制御を行う場合には $(\dot{q}_e - \dot{q}_j) - u_e$ 軌跡は直線状とはならず,ふくらみをもった形状となる.この軌跡が力行領域(第1および第3象限)を多く含む形状となる場合,消費エネルギーが増加する.最適レギュレータにおいて単位エネルギーあたりの応答低減率を向上させる(消費エネルギーを低減させる)制御の設計方法については4.4節で述べる.

次に,評価時間内におけるエネルギー消費についての評価を行う.評価時間を入力の継続時間 $t$ 秒( $t = 60$ ),回生率を $\alpha$ とし,式(4-19)および(4-20)により回生機構のないシステムでの消費エネルギー $E_1$ と回生機構を有するシステムでの消費エネルギー $E_2$ を評価する.ここで, $E_+$ は力行電力を, $E_-$ は回生電力を表している.回生機構のないシステムでは $E_-$ なるエネルギーは電動機が発電機となり,余剰電力として抵抗器に流れ,熱として廃棄される<sup>[70]</sup>ため式(4-19)は $E_-$ を含まない.

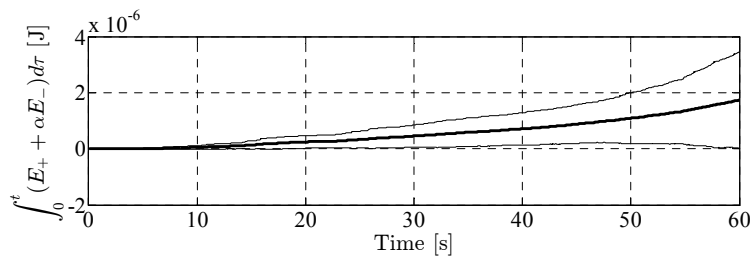
$$E_1(t) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} E_+(t) \quad (4-19)$$

$$E_2(t) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} (E_+(t) + \alpha E_-(t)) \quad (4-20)$$

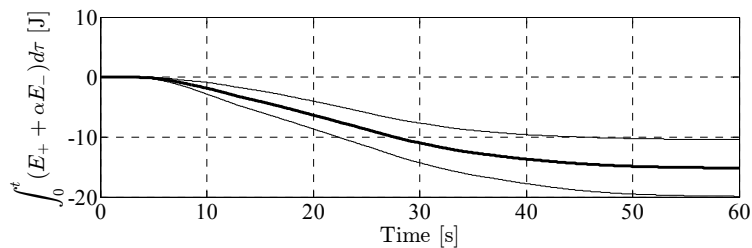
$$E_+(t) = \int_0^t u_e (\dot{q}_e - \dot{q}_j) d\tau \quad u_e (\dot{q}_e - \dot{q}_j) \geq 0 \quad (4-21)$$

$$E_-(t) = \int_0^t u_e (\dot{q}_e - \dot{q}_j) d\tau \quad u_e (\dot{q}_e - \dot{q}_j) < 0 \quad (4-22)$$

$\kappa=1$ としたときの告示波 100 波での平均と標準偏差を Figure 4-5 に示す.ここで,回生率は小池らの報告<sup>[70]</sup>から 10%程度を得られると考えられるため,回生率 $\alpha=10\%$ を与えた.



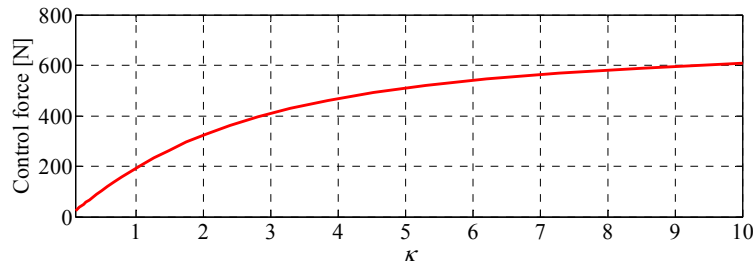
(a)  $E_1$  ( $\alpha = 0\%$ ).



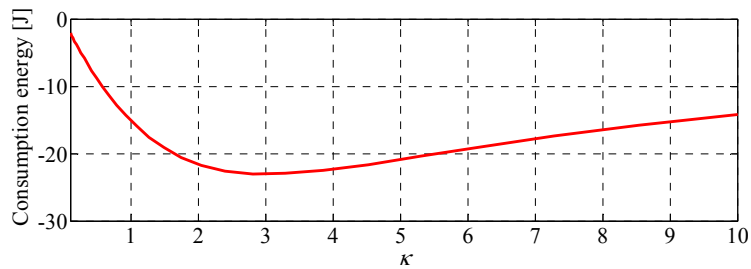
(b)  $E_2$  ( $\alpha = 10\%$ ).

Figure 4-5 Consumption energy ( $\kappa=1$ , Input: Response wave).

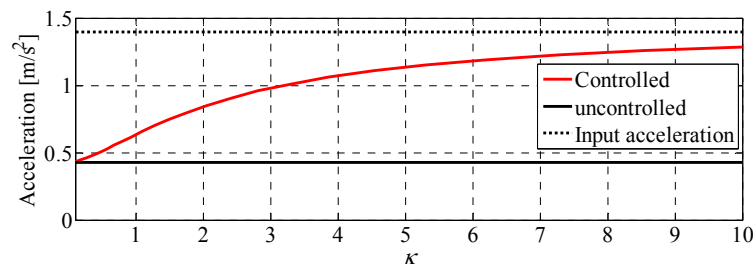
Figure 4-5 (b)より，エネルギー最適制御において  $E_2$  の値は負となっており，回生率として 10%が与えられるならば，駆動開始時を除けばセルフパワー・アクティブ制御が可能ということになる．また，Figure 4-5 (a)の  $E_1$  の値は正の値であるが極めて小さく，エネルギーの回生機構がない場合においてもエネルギー最適制御では消費エネルギーが極めて小さいといえる．すなわち，エネルギー最適制御において消費エネルギーの低減は，エネルギーの必要量  $E_+$ （力行電力）を小さくするとともに，エネルギーの回生量  $E_-$ （回生電力）を大きくすることによって達成されているといえる．



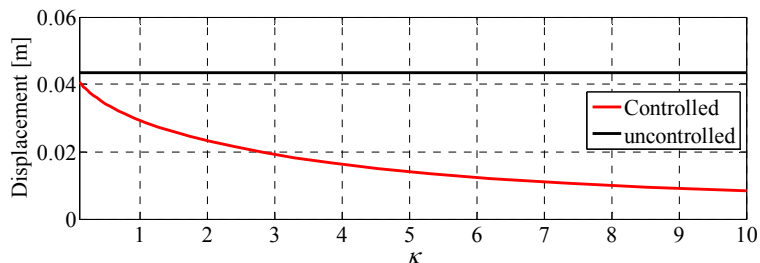
(a) Control force.



(b)  $E_2$  ( $\alpha = 10\%$ ).



(c) Acceleration.



(d) Displacement.

Figure 4-6 Plot of control performance vs.  $\kappa$ .

次に, Figure 4-6 に設計変数  $\kappa$  と最大制御力, 消費エネルギー, 絶対加速度応答, および相対変位応答の関係を示す. Figure 4-6 (b)に示す消費エネルギー (負の値なので蓄電に相当)と Figure 4-6 (d)に示す相対変位応答から, エネルギー最適制御はエネルギーに関して, 高い振動低減効率を有しているといえる. また, 非制御時の免震床面の加速度  $\ddot{q}_e$  の値の平均を Figure 4-6 (c)に破線で示す. これより, 先述したように免震床面の絶対加速度応答  $\ddot{q}_e$  についてはパッシブ比として悪化しているものの, 設置床面の加速度  $\ddot{q}_j$  と比較して最大制御力 200 N で 5 割程度低減されていることが分かる. すなわち, 非制御時 (黒実線) の絶対加速度応答と制御時の絶対加速度応答 (赤実線) と免震床設置床面の絶対加速度応答 (黒破線) の最大値が, 例えば最大制御力 200 N でおよそ 0.30 : 0.45 : 1.0 であることが Figure 4-6 (c)から読み取れるので, 絶対加速度応答に関しても免震床設置の効果があるといえる. また, 建物モデルや設置階等の条件が異なると建物応答波は変化する. 建物の条件によっては免震床の減衰や固有周期といったパラメータの最適設計も変わってくるが, 本章では制御設計部分の提案を目的とするためここでは議論しないが, 今後の課題として制御系と構造系の同時最適化が挙げられる.

#### 4.4. 最適レギュレータによるエネルギー回生を可能とする制御設計

##### 4.4.1. 相対変位・相対速度・絶対加速度による設計

本節ではエネルギー効率の良い制御をエネルギー最適制御ではなく, 最適レギュレータによって実現することができるかについての検討を行う. まず, 制御目的を免震床の相対変位, 相対速度および絶対加速度とし, 評価関数を次のようにおく.

$$J = \int_0^{\infty} \left[ \alpha_d \frac{\dot{x}_e^2}{\bar{r}_d^2} + \alpha_v \frac{\dot{x}_e^2}{\bar{r}_v^2} + \alpha_a \frac{\ddot{q}_e^2}{\bar{r}_a^2} + \gamma u_e^2 \right] dt \quad (4-23)$$

$$= \int_0^{\infty} \left[ \begin{Bmatrix} x_e & \dot{x}_e \end{Bmatrix} \mathbf{Q}_e \begin{Bmatrix} x_e \\ \dot{x}_e \end{Bmatrix} + 2 \begin{Bmatrix} x_e & \dot{x}_e \end{Bmatrix} \mathbf{S}_e u_e + R_e u_e^2 \right] dt \quad (4-24)$$

$$\mathbf{Q}_e = \frac{\alpha_a}{\bar{r}_a^2} \frac{1}{m_e^2} \begin{bmatrix} k_e^2 & k_e c_e \\ k_e c_e & c_e^2 \end{bmatrix} + \frac{\alpha_d}{\bar{r}_d^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\alpha_v}{\bar{r}_v^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

$$\mathbf{S}_e = -\frac{\alpha_a}{\bar{r}_a^2} \frac{1}{m_e^2} \begin{Bmatrix} k_e \\ c_e \end{Bmatrix} \quad (4-25)$$

$$R_e = \frac{\alpha_a}{\bar{r}_a^2} \frac{1}{m_e^2} + R \quad (4-26)$$

ここで  $\alpha, \bar{r}$  はそれぞれ制御目的に対する重み係数および, 無次元化に用いる参照最大応答であり, 添え字はそれぞれ,  $d$  は相対変位を,  $v$  は相対速度を,  $a$  は絶対加速度を表している. 参照最大応答は 4.3.2 項と同様に検討に用いる入力波での非制御時の最大応答の平均であり, 相対変位応答  $\bar{r}_d$  で 0.0436 m, 相対速度応答  $\bar{r}_v$  で 0.213 m/s, 絶対加速度応答  $\bar{r}_a$  で 0.426 m/s<sup>2</sup> である. 式(4-23)の評価関数を最小とする最適制御入力は次式で与えられる.

$$u_e = -\mathbf{F} \begin{Bmatrix} x_e \\ \dot{x}_e \end{Bmatrix} \quad (4-27)$$

$$\mathbf{F} = R_e^{-1} (\mathbf{S}_e^T + \mathbf{B}^T \mathbf{P}) \quad (4-28)$$

ここで  $\mathbf{P}$  は以下の Riccati 方程式から一意に決定される .

$$\mathbf{P}(\mathbf{A} - \mathbf{B}R_e^{-1}\mathbf{S}_e^T) + (\mathbf{A} - \mathbf{B}R_e^{-1}\mathbf{S}_e^T)^T \mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}R_e^{-1}\mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q}_e - \mathbf{S}_e R_e^{-1} \mathbf{S}_e^T = \mathbf{O} \quad (4-29)$$

ここで  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  は式(4-12)を状態空間表現した際の係数行列である .

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_e}{m_e} & -\frac{c_e}{m_e} \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{m_e} \end{bmatrix} \quad (4-31)$$

パラメータチューニングの範囲は式(4-32)とし , $\alpha_d$ ,  $\alpha_a$  については 10 刻みで変化させ , $\alpha_v$  については 0, 50, 100 の場合について Figure 4-7 に示す .

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_d \leq 100 \\ 0 \leq \alpha_v \leq 100 \\ 0 \leq \alpha_a \leq 100 \\ \gamma = \text{const.} \end{cases} \quad (4-32)$$

ここで , 消費エネルギーについては解析終了時におけるエネルギー状態を示しており , 回生率を 10 %としている . 比較として , エネルギー最適制御での結果を Figure 4-8 に示す . ここでは最適レギュレータについて , 相対変位応答と絶対加速度応答についてともに優れる領域の存在する Figure 4-7 (a)  $\alpha_v = 0$  のケースとエネルギー最適制御での結果 Figure 4-8 を比較する . これより , 最適レギュレータを用いた解析ケースのうち ,  $\alpha_v = 0$  のときにエネルギー最適制御と極めて近い性能を実現するパラメータが存在することが確認できる . その一例として時刻歴応答解析の結果を Figure 4-9 に示す . ここで ,  $\alpha_d = 1$ ,  $\alpha_v = 0$ ,  $\alpha_a = 1$ ,  $R = 1.9 \times 10^{-5}$  であり , エネルギー最適制御については  $\kappa = 1$ ,  $r = 1$  としている . Figure 4-9 より両者の結果が良く一致していることが確認できる . ただし , 2 つの制御手法では評価関数が式(4-15)と式(4-23)に示すように異なり , その解法 ( 制御力の導出方法 ) も異なる . 相対変位と絶対加速度 ( ここでは相対速度も含む ) を制御する最適レギュレータの評価関数にはエネルギーは記述されないため , エネルギーを考える場合は Figure 4-7 に示すコンター図等によるチューニングが必要となる . そのため , エネルギーの回生を重視した制御を最適レギュレータで実現するには , 同じ評価関数で考えることがパラメータのチューニングを容易にすると考えられる .

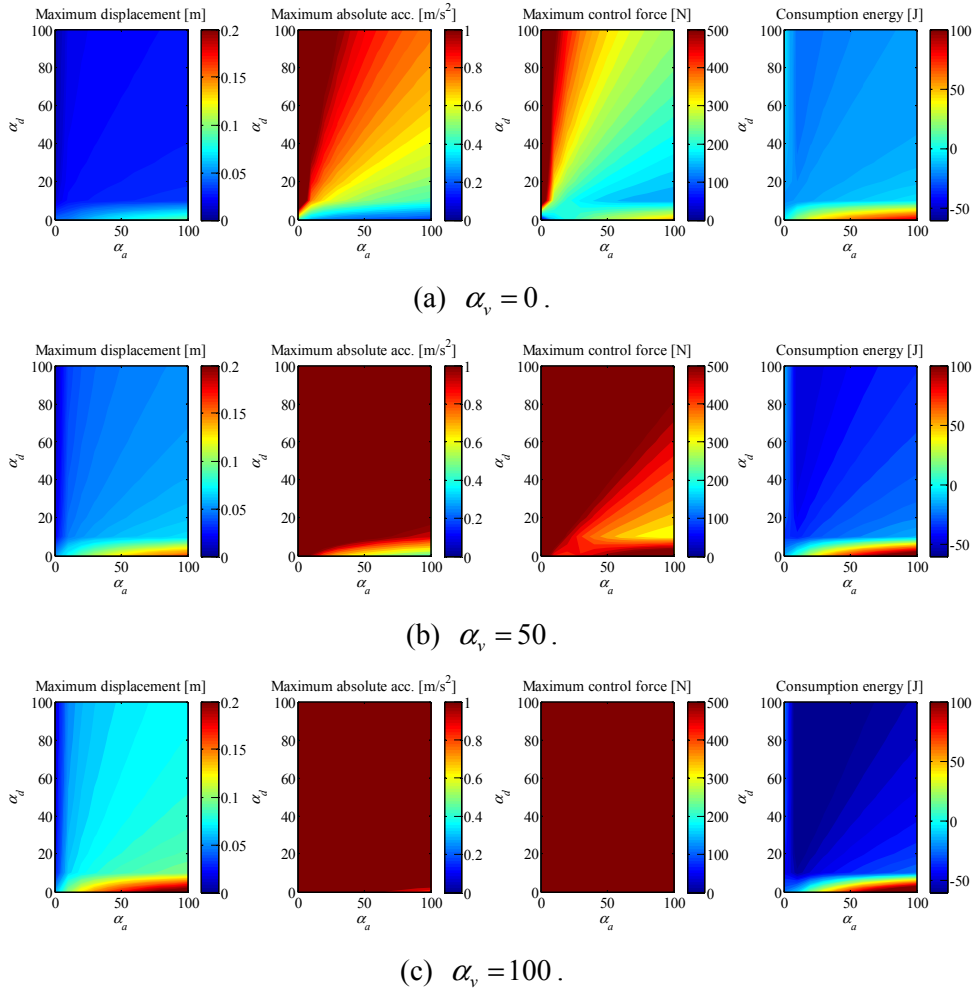


Figure 4-7 Maximum responses, control force and consumption energy using LQR control.

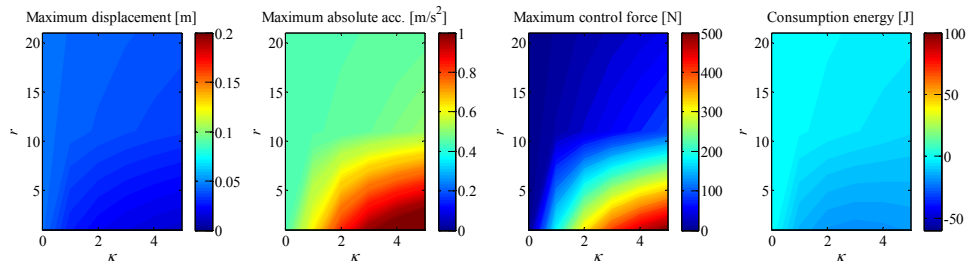
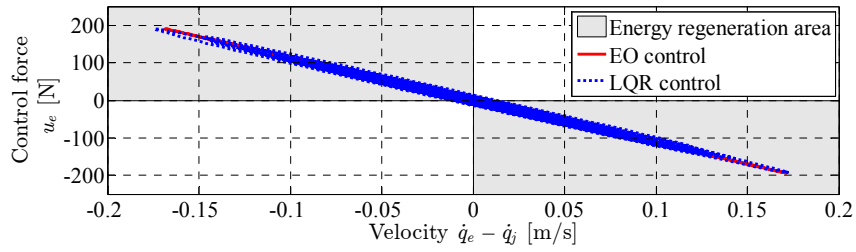
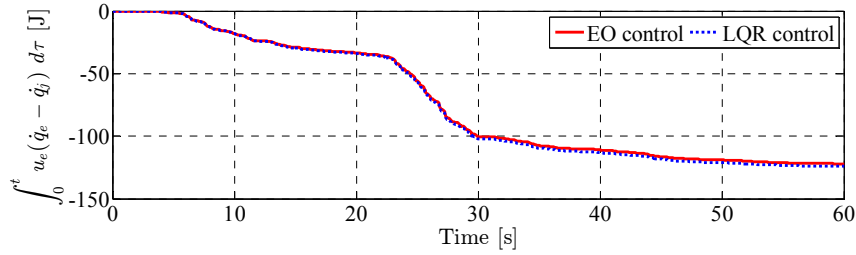


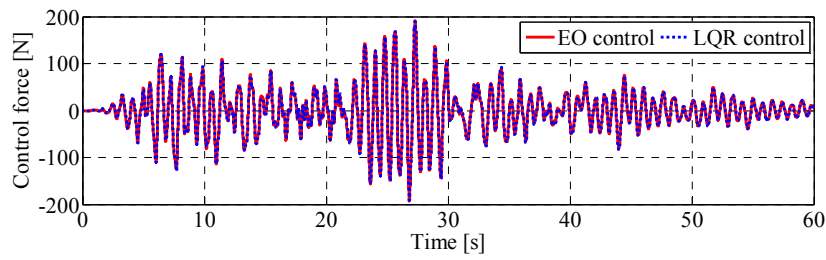
Figure 4-8 Maximum responses, control force and consumption energy using energy optimal control.



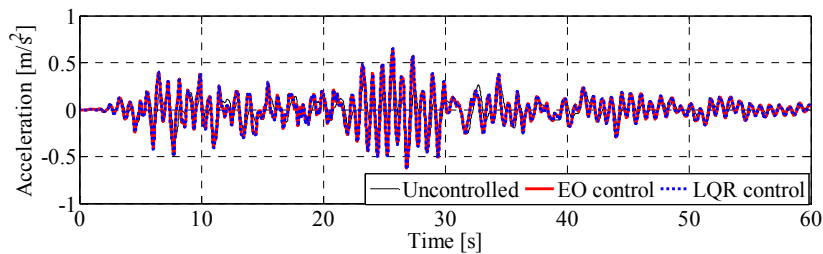
(a)  $(\dot{q}_e - \dot{q}_j) - u_e$  locus.



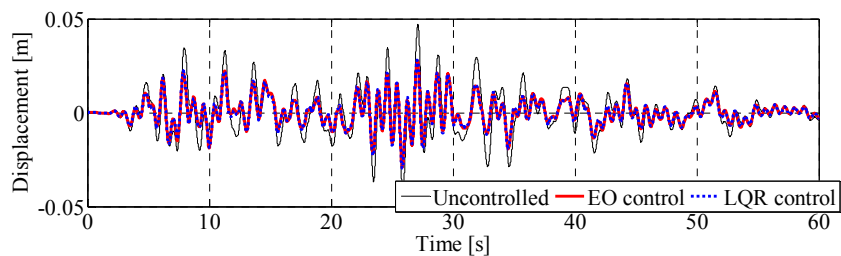
(b) Energy consumption.



(c) Control force.



(d) Absolute acceleration response.



(e) Displacement response.

Figure 4-9 Comparative analysis of LQR control and energy optimal control.

(Input: Response wave)

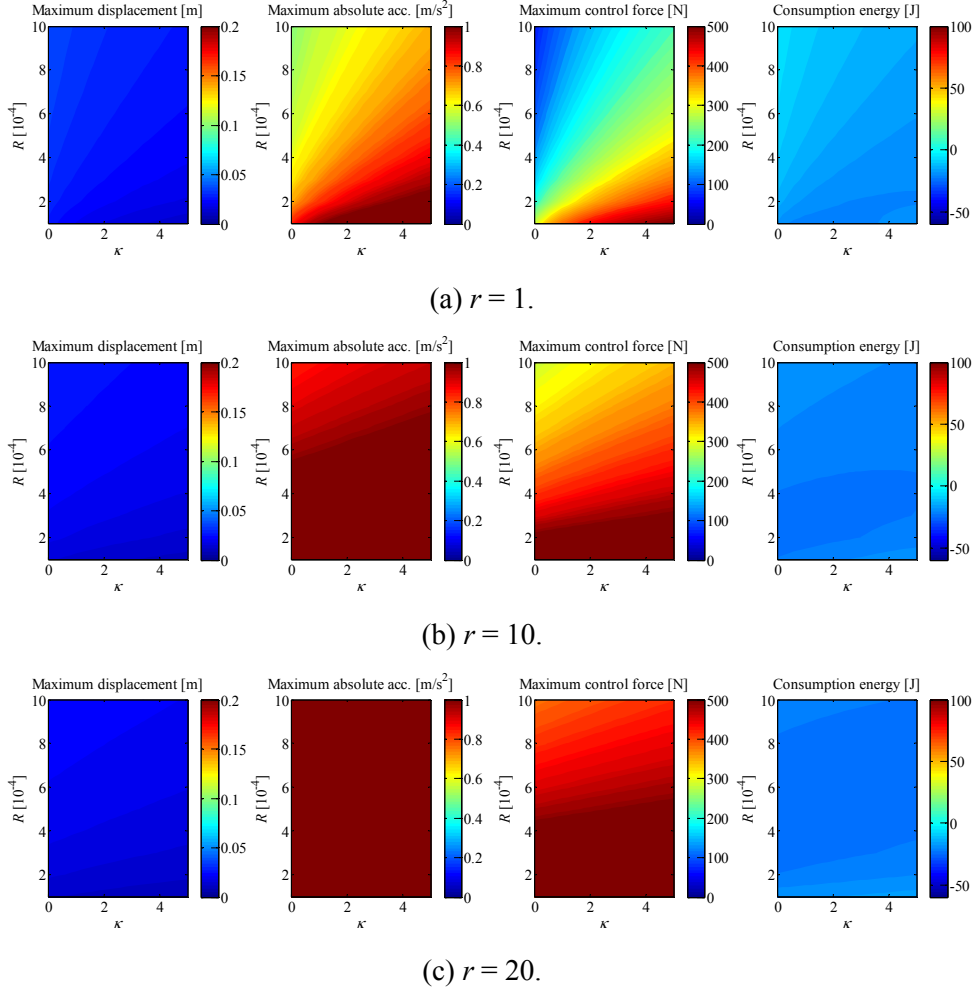


Figure 4-10 Maximum responses, control force and consumption energy using cross term of LQR control.

#### 4.4.2. 最適レギュレータにおけるエネルギー最適制御の評価関数の記述

本項では式(4-15)で表されるエネルギー最適制御の評価関数を最適レギュレータの評価関数で表現することを考える．式(4-15)を整理すると次のようになる．

$$J = \int \left[ (Q_d x_e^2 + \kappa c_e \dot{x}_e^2 + Q_a \ddot{q}_e^2) + r u_e \dot{x}_e \right] dt \quad (4-33)$$

これをもとに最適レギュレータの評価関数を  $R \neq 0$  を用いて次のように記述する．

$$J = \int \left[ Q_d x_e^2 + \kappa c_e \dot{x}_e^2 + Q_a \ddot{q}_e^2 + r \dot{x}_e u_e + R u_e^2 \right] dt \quad (4-34)$$

式(4-33)と式(4-34)の差は、最適レギュレータにおいてのみ記述された  $R u_e^2$  項となる．また、設計変数  $r$  の設計について、 $r \dot{x}_e u_e$  項は負の値をとり得るため最適レギュレータにおいては制約が生じる．式(4-34)を用いて制御を行った場合の結果を Figure 4-10 に示す．また、式(4-15)を用いて制御を行った場合の結果は Figure 4-8 である．ここで、 $Q_d, Q_a$  については式(4-17), (4-18)を用いた．式(4-33), (4-34)より、最適レギュレータにおいて  $R$  を十分に小さくすると、制御性能はエネルギー最適制御に酷似していく傾向がみられると考えられる．た

だし、エネルギー最適制御と最適レギュレータでは、その解法が式(4-16)と式(4-27)~(4-29)のように異なり、設計変数 $r$ の設計の制約も異なる。そのため、エネルギー最適制御と最適レギュレータにおいて、最大応答、制御力および消費エネルギーの酷似するパラメータ領域は存在するが、両者の違いは設計変数 $r$ と最大応答、制御力および消費エネルギーの関係に見られる。すなわち、エネルギー最適制御で $r$ を大きくする効果は、最適レギュレータにおいては $r$ を小さくしたときの効果に相当している。エネルギー最適制御においては $r$ を小さくすることで散逸エネルギーを抑え、そのエネルギーを回生する効果が大きくなると考えられたが、制御力の二乗に関する項 $Ru_c^2$ が存在する最適レギュレータにおいてはそのような関係性がみられないことが確認された。

以上より、最適レギュレータを用いたエネルギーを考慮した制御設計は可能であるが、設計変数と制御性能の関係はエネルギー最適制御と比較して難しいといえる。

#### 4.5. 結言

本章では電気系統の被害による停電が発生した場合にも稼働できる振動制御システムを構築することを目的とし、消費エネルギーの低減・継続的な稼働の実現を考えた。単位エネルギーあたりの応答の低減率向上を目標とし、エネルギーの消費量を設計変数として扱うことのできるエネルギー最適制御を建物内に設置された免震床に適用する際の、評価関数の構成要素やその重み係数の決定方法等に関する設計指針を示した。構成要素の設計指針としては、エネルギー項 $P$ には散逸エネルギーを設定すればよいこと、また、制御性能の評価式 $g$ は最適レギュレータと同様の2次形式を設定すればよいことを示した。また、重み係数 $\kappa$ により、制御性能とエネルギー消費が設定できることを示した。また、以下の知見を得た。

- エネルギー最適制御は消費エネルギーが極めて小さい。
- エネルギー最適制御においてエネルギー消費の低減は、エネルギーの必要量（力行電力）を小さくするとともに、エネルギーの回生量（回生電力）を大きくすることによって達成される。したがって、エネルギーの回生機構がない場合においても消費エネルギーの低減が達成できる。
- エネルギーの時刻歴の評価より、エネルギー最適制御を用いることで初期駆動用のバッテリーさえあれば、セルフパワーで継続的にアクティブ制御を行えることが示せた。
- 消費エネルギーの低減を図る方法として、最適レギュレータでの設計例を示し、性能評価を行った。そして最適レギュレータに基づく手法では設計変数に関して制約があるためエネルギーを評価関数内で評価することが難しく、エネルギー最適制御に基づく手法ではエネルギーを陽に考慮することで消費エネルギーをマイナスとする設計が容易であることを示した。

今後の課題として、構造系と制御系の同時最適化を考える必要がある。また、検証解析を建物・設備連成系に対して行うことが挙げられる。



## 第5章 結論

## 5.1. 総括

本論文では、地震を対象とした建物のアクティブ振動制御について、設備機器や非構造部材を含めた建物機能継続の観点からの評価関数設計法を提案した。建物機能継続に関する評価項目として「被害低減・早期復旧・継続稼働」を設定し、これらの評価を「建物の機能維持率・振動応答の収束速度・単位エネルギーあたりの最大応答の低減率」により行った。これらの評価項目の達成度を向上させる評価関数の設計方法を提案し、制御性能を数値解析により検証した。以下に 3 つの評価項目の観点から本論文の貢献を述べて総括する。

第 2 章では、建物の構造的安全性だけでなく主要設備機器等を含めた被害低減を行うために、まず、建物機能を建物構造と主要設備機器等からなる直列システムと考え、それぞれの被害発生確率とその影響度から計算される機能維持率を導入した。そして、建物構造と主要設備機器等の双方を考慮した見通しの良い制御設計を行うために、最適レギュレータにおける評価関数の制御量項の構成方法の指針を提案した。すなわち、建物の加速度や建物の層間変形角、設備機器の加速度、免震層の変位といった制御対象をそれぞれグループ化したベクトルとして考え、それらの応答を平均的に抑える制御設計法を示した。ここで評価関数は性能目標あるいは非制御時の最大応答から設定した参照最大応答を用いて無次元化した制御量の 2 乗和として記述され、ベクトルの次元で除される。本操作により、建物や設備機器等に対して複数の制御目的（制御量）が存在する場合においても、応答低減の重要度を制御に反映させることを容易とした。数値シミュレーションにより、建物が構造的な被害を受けていないものの、重要な設備機器が損傷してしまう状況の発生の低減し、機能維持率を向上させる設計となっていることを確認した。なお、ここで提案した制御量項の構成法を第 3 章、第 4 章でも用いた。

第 3 章では、振動によって停止した設備機器の早期復旧（例えばエレベータの地震時管制運転からの再稼働）のために振動応答の収束速度の向上を考え、後揺れ時に有効に装置能力を使用する手法として、制御目的を時変とし、かつ最大要求制御力を推定し、最適レギュレータの制御ゲインを更新する可変ゲインフィードバック制御を提案した。最大要求制御力については、モーダルアナリシスの 1 つである SRSS (Square Root of Sum of Squares) 法を参考に、到達した地動加速度の区分波形を用いた推定式を立式した。数値シミュレーションにおける二乗平均平方根(RMS: Root Mean Square)値の評価より、制御を地震動強度と建物の応答レベルの時間変化に順応させることで、システム全体として振動応答の収束が早まることを確認した。

第 4 章では、制御システムにおいて制振装置を駆動するためのエネルギーが不足することなく、継続的に制御を行うことができるように、単位エネルギーあたりの最大応答の低減効果の高いエネルギー最適制御を、建築分野の振動制御へ適用する方法を提示した。エネルギーの低減効果は、余震や継続時間の長い長周期地震動を受ける場合等、使用できる

エネルギー量が限定される状況下で特に重要となる．数値シミュレーションにより制御に必要なエネルギーを評価関数内で陽に考慮することによるエネルギー効率の向上を確認した．エネルギーの時刻歴の評価より，エネルギー最適制御を用いることで初期駆動用のバッテリーさえあれば，エネルギーを回生させることにより，セルフパワーで継続的にアクティブ制御を行えることが示せた．また，エネルギーを考慮した制御設計を最適レギュレータで実現する方法について示し，エネルギー最適制御と同程度の性能を得ることができ一方，設計変数の設定と性能の関係が複雑であるということを示した．

## 5.2. 今後の展望

本研究が現時点で有する課題を整理し，今後の研究の方向性で代表的なものを以下に述べる．

まず，最適レギュレータの評価関数の改良に関しては，制御対象の振動特性や，建物の敷地で想定される地震動の特性を考慮し，性能目標を周波数領域で設定すること，制御量間の相関を考慮し性能目標を設定することが挙げられる．3 章で提案した可変ゲイン制御については実装に向け計算コストを低減し，タイムラグを考慮した，リアルタイム性を有した制御則とすることが挙げられる．

また，本論ではパッシブ比として振動応答の低減を考え，制御系設計からのアプローチを行っており，パッシブ要素の最適化は行っていない．今後，構造と制御系の同時最適化が必要となる．

## 参考文献

- [1] 内閣府：地域の経済 2011 - 震災からの復興，地域の再生 - , pp. 61-62, 2011.
- [2] 日本建築学会：建築の原点に立ち返る - 暮らしの場の再生と革新 - 東日本大震災に鑑みて（第二次提言），建築雑誌，Vol. 128, No. 1650, pp. 52-65, 2013.
- [3] 東芝 IT サービス株式会社：情報資産を支えるコンピューターームの地震対策強化，*Toshiba IT-Services Corporation Mail Magazine*, Vol. 15, pp. 1-4, 2013.
- [4] 日本データセンター協会：東日本大震災を踏まえたデータセンターファシリティスタンダードの検証と見直し（ダイジェスト版），pp. 32-33, 2012.
- [5] 筧淳夫：阪神大震災で病院の建築・設備はどうなったか 建築の立場から-1，病院設備，Vol. 38, No. 2, pp. 281-285, 1996.
- [6] 兵庫県放射線技師会：兵庫県南部地震記録誌 1995 年 1 月 17 日午前 5 時 46 分 M7.2 - この経験を今後に生かすために - ，兵庫県放射線技師会，pp. 99-111, 1996.
- [7] 宮本唯男：放射線部門の地震対策ハンドブック，医療科学社，1995.
- [8] 社団法人日本エレベータ協会事故予防対応委員会・技術委員会・メンテナンス委員会：「千葉県北西部地震」を契機とする地震対応強化策検討（「昇降機耐震設計・施工指針」の見直し），エレベータ界，Vol. 41, No. 161, pp. 2-9, 2006.
- [9] 社団法人日本エレベータ協会：東北地方太平洋沖地震などの昇降機被害調査報告，エレベータ界，Vol. 47, No. 185, pp. 4-8, 2012.
- [10] 朝日新聞：避難にエレベーター活用，p. 1, 2013.9.24
- [11] 朝日新聞：火災，高齢者はエレベーター避難，東京消防庁が方針転換，p. 38, 2013.9.24
- [12] 財団法人日本建築設備・昇降機センター・社団法人日本エレベータ協会：建築基準法及び同法関連法令 - 昇降機技術基準の解説 - 昇降機耐震設計・施工指針 2009 年版，2009.
- [13] 読売新聞：橋下知事移転意向の 55 階庁舎耐震性に疑問符，<http://www.yomiuri.co.jp/national/news/20110313-OYT1T00061.htm>, 2011.4.3 閲覧
- [14] 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告( 建築編-7:建築設備・建築環境 ) ,pp. 223-224, 1999.
- [15] 日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，丸善，p. 165-166, 2011.
- [16] 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告( 建築編-7:建築設備・建築環境 ) ,p. 175, 1999.
- [17] 中村孝明，遠藤透：BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究，日本建築学会総合論文誌, No. 7, pp. 87-92, 2009.
- [18] 境茂樹，加藤貴司：建築機能を考慮した地震リスク評価手法による B C P の復旧曲線の定量化に関する研究，ハザマ研究年報，pp. 1-5, 2009.
- [19] 森田高市，溜正俊，向井智久，岩田善裕，福山洋，深田良雄：建築物の災害後の機能維持/早期回復を目指した構造的評価システムの開発：その 9 損傷評価・修復性評価データベースに基づく試評価例，日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol. B-1, pp. 67-68, 2010.

- [20] 中島拓哉, 藤田聡, 皆川佳祐: 昇降機ロープの地震時挙動解析に関する基礎的研究, 第13回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2013), Paper No. D09, pp. 1-8, 2013.
- [21] Nakajima, K., Giron, N., Kohiyama, M., Watanabe, K., Yoshida, M., Yamanaka, M., Inaba, S. and Yoshida, O.: Seismic Response Analysis of A Semi-Active-Controlled Base-Isolated Building During The 2011 Great East Japan Earthquake, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, Paper No. 138, pp. 1025-1036, CD-ROM Proceedings, 2012.
- [22] 日本建築学会: 建築構造物の振動制御入門, 丸善, p.5, 2010.
- [23] 朝日新聞 DIGITAL: 免震ビル, 震災の揺れ半減も 長周期にも効果確認, <http://www.asahi.com/special/10005/TKY201107040224.html>, 2013.5.7 閲覧.
- [24] 佐藤栄児, 酒井久伸, 福山國夫, 古川幸, 鎌田崇義, 笥淳夫, 小林健一, 井上貴仁, 中島正愛: 医療施設の機能保持性能を検証するための実大震動台実験 - 震災時における都市施設の安全性・機能性評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 650, pp. 771-780, 2010.
- [25] Xu, Y.L., Liu, H.J. and Yang, Z.C.: Hybrid platform for vibration control of high-tech equipment in buildings subject to ground motion. Part 1: Experiment, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 8, pp. 1185-1200, 2003.
- [26] Alhan, C. and Gavin, H.P.: Reliability of base isolation for the protection of critical equipment from earthquake hazards, *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 9, pp. 1435-1449, 2005.
- [27] Xu, Y.L. and Li, B.: Hybrid platform for high-tech equipment protection against earthquake and microvibration, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 8, pp. 943-967, 2006.
- [28] Kohiyama, M. and Baba, T.: Frequency Shaping and Variable Gain Feedback to Control Seismic Response of a Building and Elevator Rope, *Proc. 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Paper No. 259, pp. 1-8, 2010.
- [29] 小檜山雅之, 馬場敏光: 機能維持を目的とした建物・エレベータ連成系の周波数整形・可変ゲインフィードバック制御, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 670, pp. 2059-2067, 2011.
- [30] Baba, T. and Kohiyama, M.: Seismic Response Control of a Building and Elevator Rope with Active Mass Damper, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol. 58, pp. 19-30, 2010.
- [31] Watanabe, K., Miura, N., Kohiyama, M. and Takahashi, M.: Experimental Research of Seismic Response Control of Building-Elevator System Using Linear Quadratic Gaussian Controller, *9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 09-126, pp. 1527-1531, CD-ROM Proceedings, 2012.
- [32] 勝野友介, 松久寛, 宇津野秀夫, 山田啓介, 澤田勝利: 永久磁石の吸引力を利用したエレベーターロープの非接触制振, 関西支部講演会講演論文集, Paper No. 1031, p.

- 1, 2008.
- [33] 大槻真嗣, 吉田和夫, 中川俊明, 木村弘之, 藤本滋: エレベーターロープのロバスト振動制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 703, pp. 95-102, 2005.
- [34] 大槻真嗣, 吉田和夫, 木村弘之, 中川俊明, 伊東弘晃, 飯島智樹: エレベーターロープ横振動のセミアクティブ振動制御, *Dynamics and Design Conference 2006*, Paper No. 508, pp. 1-6, 2006.
- [35] Nishitani, A. and Inoue, Y.: Overview of the application of active/semiactive control to building structures in Japan, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 11, pp. 1565-1574, 2001.
- [36] Ikeda, Y.: Active and semi-active vibration control of buildings in Japan—Practical applications and verification, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 16, pp. 703-723, 2009.
- [37] Kobori, T., Takahashi, M., Nasu, T., Niwa, N. and Ogasawara, K.: Seismic response controlled structure with active variable stiffness system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, No. 11, pp. 925-941, 1993.
- [38] Fujinami, T., Saito, Y., Morishita, M., Koike, Y. and Tanida, K.: A hybrid mass damper system controlled by H<sub>∞</sub> control theory for reducing bending-torsion vibration of an actual building, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, pp. 1639-1653, 2001.
- [39] Adhikari, R. and Yamaguchi, H.: Sliding Mode Control of Buildings with ATMD, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, No. 4, pp. 409-422, 1997.
- [40] Wang, A.P. and Lin, Y.H.: Vibration control of a tall building subjected to earthquake excitation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 299, pp. 757-773, 2007.
- [41] Spencer, B.F.Jr., and Sain, M.K.: Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 17, No. 6, pp. 19-35, 1997.
- [42] 姜聲国, 吉田和夫: アクティブ振動制御における評価関数と制御特性, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 58, No. 552, pp. 2373-2380, 1992.
- [43] Tyler, J.S. Jr. and Tuteur, F.B.: The Use of a Quadratic Performance Index to Design Multivariable Control Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-11, No. 1, pp. 84-92, 1966.
- [44] Rynaski, E.G.: Optimal Helicopter Station Keeping, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-11, No. 3, pp. 346-355, 1966.
- [45] Bryson, A.E. Jr. and Ho, Y.C.: *Applied Optimal Control*, Taylor & Francis, 1975.
- [46] Javad M., Goodarz A. and Ratneshwar J.: Optimal preview active control of structures during earthquakes, *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 10, pp. 1463-1471, 2004.
- [47] Franklin, G. F., Powell, J. D. and Emami-Naeini, A.: *Feedback Control of Dynamic Systems*, Prentice-Hall, 2002.
- [48] Naidu, D.S.: *Optimal Control Systems*, CRC Press, 2002.
- [49] Tada, Y., Matsumoto, R. and Nagai, M.: *Optimum Structural Design Considering Vibration*

- Control, *JSME international journal Series*, Vol. 35, No. 3, pp. 413-420, 1992.
- [50] James M.R., Yunbyeong C. and Richard S.: Real-Time Hybrid Simulation and Application to Earthquake Engineering, *9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 08-279, pp. 1-10, 2012.
- [51] Chang, C. and Zhou, L.: Neural Network Emulation of Inverse Dynamics for a Magnetorheological Damper, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 2, pp. 231-239, 2002.
- [52] Mahmoud, M.S., Zribi, M. and Soh, Y.C.: Optimal control of seismically-excited building structures, *Computers and Structures*, Vol. 74, No. 5, pp. 521-533, 2000.
- [53] Ho, C.C. and Ma, C.K.: Active vibration control of structural systems by a combination of the linear quadratic Gaussian and input estimation approaches, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 301, pp. 429-449, 2007.
- [54] Raja, S., Sinha, P.K. and Prathap, G.: Active Stiffening and Active Damping Effects on Closed Loop Vibration Control of Composite Beams and Plates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 22, No. 12, pp. 1101-1121, 2003.
- [55] Oral, Ö., Çetin, L. and Uyar, E.: A Novel Method on Selection of Q And R Matrices In The Theory Of Optimal Control, *International Journal of Systems Control*, Vol. 1, No. 2, pp. 84-92, 2010.
- [56] 高橋香織, 矢代晴実, 福島誠一郎: 地震時における地域の機能維持のための耐震性能の考え方その1 既存の重要度係数について, *日本建築学会学術講演梗概集*, Vol. F-1, pp. 921-922, 2010.
- [57] Agrawal, A.K., Yang, J.N., Schmitendorf, W.E. and Jabbari, F.: Stability of Actively Controlled Structures with Actuator Saturation, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 4, pp. 505-512, 1997.
- [58] 西谷章, 仁田佳宏: AMDの可動限界を考慮した可変フィードバックゲイン制御による制震, *日本建築学会構造系論文集*, No. 503, pp. 61-68, 1998.
- [59] 長島一郎, 西山正三, 篠崎祐三: アクティブマスダンパーを用いた建物の振動制御(その2, 装置能力の制約を考慮した可変ゲイン制御手法とその制御性能に関する研究), *日本建築学会構造系論文集*, No. 483, pp. 39-49, 1996.
- [60] 奥田浩文, 蔭山満: スピルオーバーの防止とAMDストローク制約下における可変ゲインの設定を考慮した最適制御手法に関する実験的研究, *日本建築学会構造系論文集*, No. 532, pp. 87-94, 2000.
- [61] 河上哲士, 馬場研介: 状態推定法に基づくモデル規範形適応制震システムの飽和操作(その1, 飽和制御の基本構成), *日本建築学会近畿支部研究報告集(構造系)*, Vol. 44, pp. 241-244, 2004.
- [62] 藤田隆史, 鎌田崇義, 正木信男: 多段積層ゴムと油圧アクチュエータを用いた高層建物制振用アクティブ・マスダンパの基礎的研究(第2報: 建物・マスダンパ系実験モデルによる振動制御実験), *日本機械学会論文集C編*, Vol. 59, No. 558, pp. 379-385,

- 1993.
- [63] 板垣紀章, 西村秀和, 下平誠司: ゲインスケジューリングによるアクチュエータの飽和を考慮したアクティブ免震, *Dynamics & Design Conference*, Paper No. 117, pp. 1-6, 2003.
- [64] 須田義大, 中代重幸, 中野公彦: 回生された振動エネルギーを利用するアクティブ制御に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 63, No. 613, pp. 3038-3044, 1997.
- [65] 須田義大, 中代重幸, 中野公彦, 綱島均, 鷲津豪: セルフパワードアクティブ振動制御に関する研究: ランダム波外乱に対する応答とトラックのキャブサスへの応用の検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 64, No. 628, pp. 4770-4776, 1998.
- [66] Zuo, L. and Cui, W.: Dual-Functional Energy-Harvesting and Vibration Control: Electromagnetic Resonant Shunt Series Tuned Mass Dampers, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 135, No. 5, pp. 1-9, 2013.
- [67] Cui, W., Tang, X. and Zuo, L.: H<sub>2</sub> Optimization of Electricity-Generating Tuned Mass Dampers for Simultaneous Vibration Control and Energy Harvesting, *Proceedings of SPIE*, Vol. 8688, pp. 1-7, 2013.
- [68] Tang, X. and Zuo, L.: Simulation and Experiment Validation of Simultaneous Vibration Control and Energy Harvesting from Buildings using Tuned Mass Dampers, *Proceedings of American Control Conference*, Vol. 4, pp. 3134-3139, 2011.
- [69] Ichchou, M. N., Loukil, T., Bareille, O., Chamberland, G. and Qiu, J.: A reduced energy supply strategy in active vibration control, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 12, Paper No. 125008, pp. 1-11, 2011.
- [70] 小池裕二, 今関正典, 風間睦広: レール型フル・アクティブ式制振装置による高層ビルの振動制御, *IHI 技報*, Vol. 51, No. 4, pp. 17-23, 2011.
- [71] 曾根孝行, 山本雅史: 電力回生機構付きアクティブマスダンパーの強風時・地震時観測結果, 日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 82, No. I, pp. 237-240, 2012.
- [72] Scruggs, J.T. and Iwan, W.D.: Structural Control Using Regenerative Force Actuation Networks, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 995, pp. 1-14, 2004.
- [73] 丹羽直幹: アクティブ制震システムの提案と装置エネルギースペクトルによる特性分析(制震ダンパでのエネルギー変換を利用したアクティブ制震 その1), 日本建築学会構造系論文集, No. 600, pp. 51-59, 2006.
- [74] 福島直人: 制御対象のエネルギー収支に着目した機械力学系の最適制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 722, pp. 3106-3114, 2006.
- [75] Park, K.S. and Ok, S.Y.: Optimal Design of Actively Controlled Adjacent Structures for Balancing the Mutually Conflicting Objectives in Design Preference Aspects, *Engineering Structures*, Vol. 45, pp. 213-222, 2012.
- [76] 示村悦二郎: 最適レギュレータ理論の実用化への展開, 電気学会論文誌 C 編, Vol. 108, No. 1, pp. 3-11, 1988.



- [77] 三浦奈々子, 小檜山雅之: 地震動強度と応答レベルに順応する超高層建物・エレベータ連成系の可変ゲインフィードバック制御, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 670, pp. 2069-2076, 2011.
- [78] 吉田美奈子, 小檜山雅之, 高橋正樹: 線形 2 次レギュレータを用いた建物・エレベータロープの分散協調制御手法の比較, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 77, No. 675, pp. 705-714, 2012.
- [79] 内田健康: ゲインスケジューリング, 計測と制御, Vol. 34, No. 3, pp. 182-187, 1995.
- [80] Rugh, W.J. and Shamma, J.S.: Research on gain scheduling, *Automatica*, Vol.36, pp. 1401-1425, 2000.
- [81] Shirazi, F.A., Grigoriadis, K.M. and Song, G.: Parameter Varying Control of an MR Damper for Smart Base Isolation, *Proc. American Control Conference*, Vol. 4, pp. 2492-2497, 2011.
- [82] Shamma J.S. and Athans M.: Guaranteed properties of gain scheduled control for linear parameter-varying plants, *Automatica*, Vol. 27, No. 3, pp. 559-564, 1991.
- [83] Shamma J.S. and Athans M.: Gain Scheduling: Potential Hazards and Possible Remedies, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 12, No. 3, pp. 101-107, 1992.
- [84] 国土交通省住宅局建築指導課, (独)建築研究所, 日本建築行政会議, (社)日本免震構造協会, (財)日本建築センター: 免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説, 工学図書, 2001.
- [85] 日本建築学会: 長周期地震動と建築物の耐震性, pp. 233-238, 2007.
- [86] 畑野信夫, 前田昌孝: コンピューターシステム及び付帯設備(地震防災と機器免震), 建築設備と配管工事, pp. 63-67, 2002.
- [87] Miura, N. and Kohiyama, M.: Vibration Control Method for a Building Structure-Equipment System to Reduce both Structural and Functional Damages, *9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 09-072, pp. 1473-1478, CD-ROM Proceedings, 2012.
- [88] 高橋徹, 貞弘雅晴, 斉藤大樹, 小豆畑達哉, 森田高市, 野口和也, 箕輪親宏: 長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. B-2, pp. 497-498, 2007.
- [89] Gupta, N.K.: Frequency-Shaped Cost Functionals: Extension of Linear-Quadratic-Gaussian Methods, *Journal of Guidance and Control*, Vol. 3, No. 6, pp. 529-535, 1980.
- [90] Ito, T. and Kohiyama, M.: Seismic Vibration Control of a Multi-Story Building Considering Damage Risk of Accommodated Computer Servers, *MJIIT-JUC Joint International Symposium (MJJIS2013)*, Paper No. MP-9-2, pp. 1-2, CD-ROM Proceedings, 2013.
- [91] Ito, T. and Kohiyama, M.: Seismic Vibration Control of a Building Considering Fragility Curves of Accommodated Computer Servers, *Proc. 11th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Paper No. CN11, pp. 1-8, USB Proceedings, 2013.
- [92] 木村弘之, 伊東弘晃, 中川俊明: エレベータ・ロープの横振動解析(時間とともに長さの変わるロープの強制振動), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 706, pp.

- 1871-1876, 2005.
- [93] 木村弘之, 飯島智樹, 松尾繁憲, 藤田善昭: エレベータ・ロープの横振動解析 (実験結果と解析結果の比較), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 737, pp. 31-36, 2008.
- [94] 木村弘之, 関子, 飯島智樹, 石井隆史, 井手西真人: エレベータ・ロープの横振動解析 (地震時の揺れ検出のための簡易計算法), *Dynamics and Design Conference 2008*, Paper No. 403, pp. 1-6, 2008.
- [95] 小池裕二, 中川啓三, 今関正典, 村田保, 白木博文: 連結型アクティブ制振装置の開発と高層 3 棟への適用, 石川島播磨技報, Vol. 43, No. 1, pp. 14-20, 2003.
- [96] 三井亜沙美, 小檜山雅之: メインロープの震害軽減のための建物・エレベーター連成系の基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 621, pp. 41-48, 2007.
- [97] 北鉄也, 小檜山雅之: CCQC 法を用いた建物・エレベーター連成非比例減衰系の地震被害リスク評価, 日本建築学会技術報告集, Vol. 16, No. 34, pp. 883-888, 2010.
- [98] 三浦奈々子, 小檜山雅之: 地震時における建物機能維持を目的とした振動制御の二次形式評価関数の設計法, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No. 687, pp. 923-929, 2013.
- [99] 木村弘之, 久々湊峰也: エレベータ・ロープの地震時揺れ検出のための簡易計算法 (張力分布の影響を考慮した場合), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 801, pp. 1237-1246, 2013.
- [100] 小川要一, 藤田聡, 皆川佳祐: エレベータロープ横振動解析システムの構築における基礎的検討, 日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集, No. 12-79, pp. 121-122, 2012.
- [101] Der Kiureghian, A.: A Response Spectrum Method for Random Vibration Analysis of MDF Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, No. 5, pp. 419-435, 1981.
- [102] Der Kiureghian, A.: Structural Response to Stationary Excitation, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 106, No. 6, pp. 1195-1213, 1980.
- [103] Zhou, X.Y., Yu, R.F. and Dong, D.: Complex Mode Superposition Algorithm for Seismic Responses of Non-Classically Damped Linear MDOF System, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 597-641, 2004.
- [104] 小川要一, 藤田聡, 皆川佳祐: エレベータロープ横振動解析システムの構築, 日本機械学会昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩技術講演会講演論文集, Vol. 2013, pp. 31-34, 2013.
- [105] Miura, N. and Kohiyama, M.: Vibration Reduction of a Building-Elevator System Considering the Intensity of Earthquake Excitation, *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 278, pp. 1-10, USB Proceedings, 2012.
- [106] 松島豊: 高層建築物の動的解析用地震動に関する研究, 日本建築センター平成 6 年度研究助成報告書, No. 9404, 1994.
- [107] 福島直人, 萩原一郎: エネルギー最適制御理論: 最適制御理論の新しい枠組みとそ

- の発展性について，応用数理，Vol. 21, No. 4, pp. 259-275, 2011.
- [108] 福島直人，萩原一郎：エネルギー収支に着目した新しい最適制御理論の構築とその適用，応用数理，Vol. 17, No. 2, pp. 138-154, 2007.
- [109] Elsgolc, L.E.：科学者・技術者のための変分法，瀬川富士訳，ブレイン図書出版，1972.
- [110] Nakano, K., Suda, Y. and Nakadai, S.: Self-Powered Active Vibration Control Using Continuous Control Input, *JSME international journal Series C*, Vol. 43, No. 3, pp. 726-731, 2000.
- [111] 中野公彦，須田義大，中代重幸：セルフパワー・アクティブ振動制御のエネルギー収支，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 67, No. 658, pp. 1785-1791, 2001.
- [112] 三浦奈々子，新川友梨，小檜山雅之：被害有無判定を目的とした地震動の到来確率を考慮した建物等価線形モデルに関する比較研究，日本建築学会大会学術講演会，Vol. B-1, pp. 361-362, 2010.
- [113] 福喜多輝，斎藤知生，河野行伸，久保田哲也：精密生産施設への適用に向けたアクティブ免震床，*Dynamics & Design Conference*, Paper No. 107, pp. 1-6, 2007.
- [114] 日本建築学会：免震構造設計指針，丸善出版，2013.
- [115] 東野さやか，北村春幸：粘性ダンパーを付与した免震構造のエネルギーの釣合に基づく応答評価法，日本建築学会構造系論文集，Vol. 588, pp. 79-86, 2005.
- [116] 鳥井信吾，室田伸夫，山根尚志，北村春幸，高山峯夫，太田雅己，芳沢利和：高減衰型積層ゴムの各種依存性を評価した解析手法と製品検査に関する一考察—エネルギーの釣り合いに基づく包絡解析法の適用，日本建築学会技術報告集，No. 8, pp. 101-106, 1999.

## 謝辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程在学中に、同大学理工学部高橋正樹准教授の指導のもとに行ったものです。

指導教員の高橋正樹准教授には、懇切丁寧なご指導を賜りました。本研究をこのように纏めることができましたのも、先生のご指導の賜物です。本論に纏めた研究内容だけではなく、研究の着眼点や進め方、研究室運営の方法等、先生からは学ぶことばかりでした。今後とも、ご指導ご鞭撻を賜りますよう宜しくお願い申し上げます。

慶應義塾大学理工学部の三田彰教授、大森浩充教授、小國健二准教授には博士論文審査の副査を快くお引き受けいただきました。先生方からの多くのご助言により、本論文の完成度を高めることができました。ここに記して改めて謝意を表します。

慶應義塾大学理工学部の小檜山雅之准教授には本論の2章および3章のベースとした論文に関してご指導いただきました。本論において根幹となっております防災・減災という研究分野の重要性を先生から学びました。御礼申し上げます。

北川良和博士には、先生が慶應義塾大学理工学部の教授をお勤めになられていたときから現在に至るまで、研究内容や研究者としての仕事・役割について多くの貴重なご助言を賜りました。先生から地震工学について学ぶことができたことを誇りに思っております。清水建設株式会社の福喜多輝博士、株式会社大林組の吉田治博士には交流会において著者の研究の方向性について議論の場を設けていただき、有意義なご助言を多数いただきました。ヤクモ株式会社の西山禎昌博士には実際の免震装置や制振機器に関すること等、大変参考となる様々なご助言をいただきました。また、若手の研究者の方々との交流の場を作ってください、著者の研究生活の中で大変大きな刺激となりました。明治大学の松岡太一専任講師、埼玉工業大学の皆川佳祐講師には研究だけではなく進路に関して等、多くのお話を伺わせていただきました。東京農工大学の田川泰敬教授、慶應義塾大学大学院の西村秀和教授には、学会にて建物の振動制御に関する大変有益なご助言をいただきました。また、皆様と学会等でお話をさせていただけたことが次への励みとなっております。この場をお借りして御礼申し上げます。

株式会社大林組の馬場敏光氏、株式会社NTTファシリティーズの渡邊啓介氏、株式会社ドワンゴの吉田美奈子氏、慶應義塾大学大学院の石崎樹氏には本研究を進めるにあたり大変お世話になりました。本研究の前身である馬場氏の研究には多く学び感銘を受けました。渡邊氏には本論の直接の内容ではありませんが建物-エレベーターロープの共振振動の振動台実験を主体となって行っていただきました。その知見が数値解析ベースの研究をする著者の研究生活の中で、新しい問題を考える契機となりました。また、吉田氏、石崎氏の研究は著者とは違うアプローチで振動制御を考えており、研究のミーティングでは大変良い刺激となりました。京都工芸繊維大学の本宮潤一氏とは同じ建築の振動制御の研究を行う仲間として、学会や博士のコミュニティでよきライバルとして交流をもっていることを嬉しく思っております。品川区役所の佐々木健人氏には、著者が学部4年で初めて研究というものに触れたときから卒業後の現在に至るまで、毎年研究のディスカッション等交流の

機会をいただいております。実務者の視点から見る地震防災は、著者のモチベーションを上げるものでした。法政大学の川久保俊助教には、著者が博士課程に進学したばかりの頃から現在に至るまで、研究分野は違うものの多くのご助言、励ましをいただきました。また、株式会社情報科学テクノシステムの仲田季寧博士、慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程同期の山田泰之博士には、研究分野は違うものの本論文を纏めるにあたってご助言をいただき、また博士の先輩として進路・仕事に関してお話を多く伺うことができ、狭かった私の視野を広げてくださいました。偉大なる先輩方、良き友人、後半の皆に感謝致しております。ここに記して御礼申し上げます。

秘書の明石陽子氏、野田佳子氏には事務的な面、精神的な面からいつも支えていただきました。厚く御礼申し上げます。また、働く女性として著者の憧れでもありました。

高橋研究室の皆様からは、いつも良い刺激を受けておりました。研究に対して真摯で、かつ楽しそうな研究室の雰囲気がとても好きでした。学生としての最後の研究生活を楽しむことができ、大変なことも多くありましたが充実した毎日を送れたのも皆様のお陰だと思っております。有難うございました。

幼少の頃より憧れていた研究者ですが、困難なことに何度も挫けそうになりました。その度に支えてくれた父 正幸、母 京子、姉 明香子、祖母 なつ子、祖父 奥村博行、祖母 奥村君子、また、晴れ姿を見せることは叶いませんでしたが、亡き祖父 正一、そしてかけがえのない友人達に感謝致します。漸くたどり着いた研究者としての入口に期待と不安を持ちつつ、これからも知性を良く用い、教養を身につけ、真剣に真理を探究し、絶えず学び続けて行きたいと思えます。

2014年2月12日

# 付録

## A. 2章の付録

### A.1 免震層の非線形モデル

高減衰ゴム系積層ゴムや鉛プラグ挿入型積層ゴム等のダンパ機能を有する免震層の場合、復元力特性は弾性要素と完全弾塑性要素に分離したモデルで評価できる<sup>[114]</sup>。免震層の復元力特性について、粘性型ダンパのみの場合を Figure A-1 に、粘性型ダンパと履歴型ダンパを併用した場合を Figure A-2 に示す。ここで、横軸  $\delta$  は変位を縦軸  $Q$  はせん断力を表しており、それぞれ  $\delta_{\max}$  は最大変位、 $\delta_y$  は履歴型ダンパの降伏変位、 $Q_{\max}$  は最大負担せん断力、 $Q_y$  は降伏耐力を表している。また、 $k_f$  は積層ゴムの剛性、 $k_s$  は履歴型ダンパ（完全弾塑性型）の弾性剛性である。Figure A-1 および Figure A-2 において着色部分の面積はエネルギーを表しており、それぞれ  $fW_e$  は積層ゴムの弾性ひずみエネルギー、 $hW_d$  は粘性型ダンパの吸収エネルギー、 $sW_p$  は履歴型ダンパの吸収エネルギーである。積層ゴムはある変形量までは荷重と変位が比例する傾向を示し、それ以上の変形ではせん断ひずみに対するせん断応力が徐々に増加していく傾向（ハードニング）を示し、やがて破断に至る。この現象はゴム材料の特徴といえる。しかし免震層の設計においては、積層ゴムの地震時の変形を弾性領域内に抑えるように積層ゴムの選択がなされるため、ここでは Figure A-1 (a) に示すように弾性剛性として取り扱う。

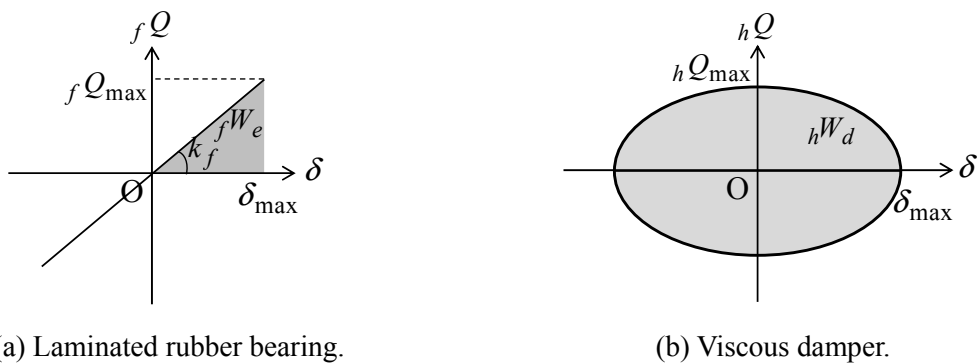


Figure A-1 Restoring force characteristics of isolation with viscous damper<sup>[115]</sup>.

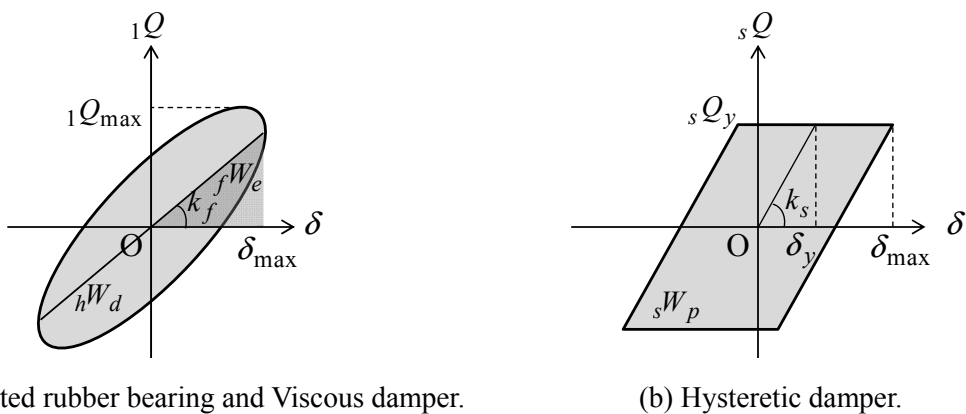


Figure A-2 Restoring force characteristics of isolation with viscous and hysteretic dampers<sup>[115]</sup>.

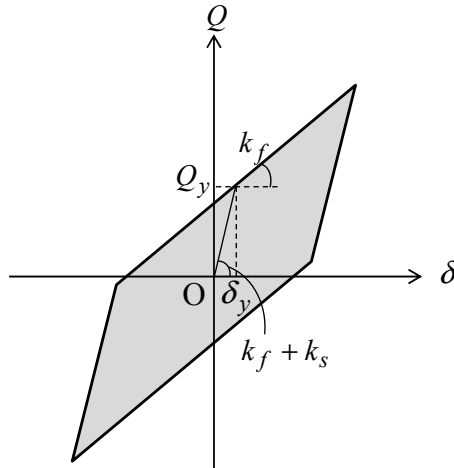


Figure A-3 Bilinear model.

Table A-1 Physical parameters.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Stiffness coefficient of laminated rubber bearing and hysteretic damper.	$k_f + k_s$	$2.71 \times 10^7$	N/m
Stiffness coefficient of laminated rubber bearing	$k_f$	$1.91 \times 10^7$	N/m
Equivalent stiffness coefficient	$k_i$	$2.71 \times 10^7$	N/m
Yield displacement	$\delta_y$	0.0444	m
Damping coefficient	$c_i$	$4.30 \times 10^6$	N·s/m

また、粘性型ダンパは速度比例型とする、2章における解析はこのうち Figure A-1 に示す粘性型ダンパのみの場合に相当する。

Figure A-2 に示す要素のうち、剛性に由来するものを纏めると Figure A-3 のようになる。ここで履歴型ダンパの降伏変位  $\delta_y$  を式(A-1)で与える。ここで  $Q_y$  および  $k_f + k_s$  の値は文献 [116]によった。

$$\delta_y = \frac{Q_y}{k_f + k_s} = \frac{21.9}{4.93 \times 10^2} = 0.0444 \quad (\text{A-1})$$

検証（非線形）モデルの諸元を Table A-1 に示す。1次剛性  $k_f + k_s$  は等価剛性  $k_i$  に等しいとし、2次剛性  $k_f$  は免震層の変位が非制御時に 0.5 m（2章で設定した性能目標  $p_{id}$ ）を超えない範囲で与えた。なお、減衰は2章と同様に等価剛性( $k_i$ )比例型とした。

## A.2 検証解析

ここでは Figure A-2 (b)に示す非線形の復元力特性を有する免震層モデルを用いた検証解析モデルにより、2章で提案した手法の有効性を示す。なお、制御ゲインは2章で用いたものを踏襲する。

まず、レベル 2 の告示波 1 波を入力した際のせん断力と変位の履歴を Figure A-4 ~ Figure A-7 に示す。ここで Figure A-4 および Figure A-5 は 2 章で示した線形モデルに対する解析結果である。Figure A-5 と Figure A-7 を比較すると、非線形モデルでは履歴型ダンパの降伏による免震層変位の増加および吸収エネルギーの増加が確認できる。

次に、非線形モデルに対して 2 章で用いたレベル 2 の告示波 100 波を入力した結果の平均を Table A-2 に示す。

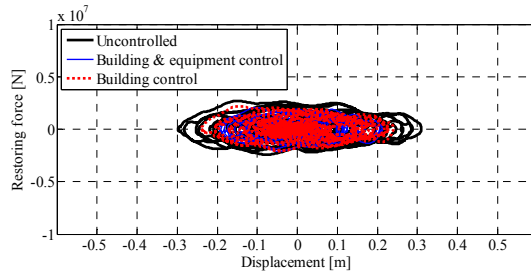


Figure A-4 Viscous damper (Chapter 2).

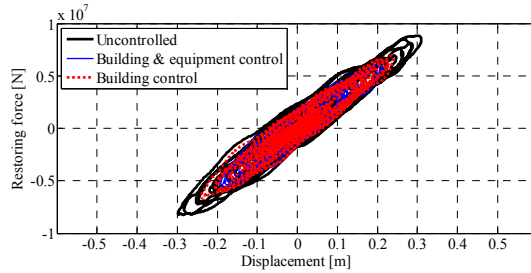
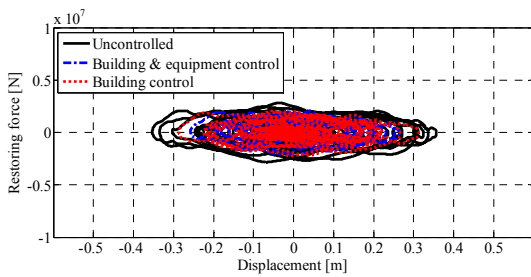
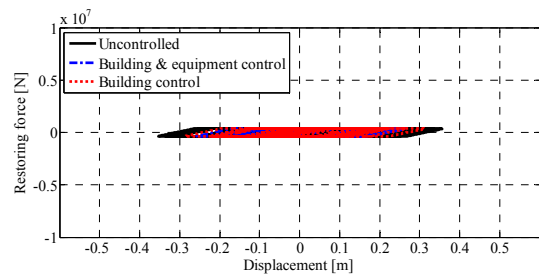


Figure A-5 Laminated rubber bearing and viscous damper (Chapter 2).



(a) Viscous damper.



(b) Hysteretic damper.

Figure A-6 Dampers.

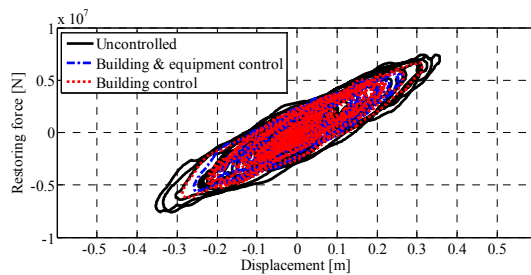


Figure A-7 Laminated rubber bearing, viscous damper and hysteretic damper.



Table A-2 Maximum responses.

	Building		Equipment
	Interstory drift	Isolation layer drift	Absolute acceleration
	[rad]	[m]	[m/s <sup>2</sup> ]
Uncontrolled	0.00172	0.425	1.66
Building & equipment control	0.00124	0.339	1.07
Building control	0.00128	0.320	1.14

非制御時応答の傾向について、Table 2-5 と Table A-2 の比較より、非線形モデルでは免震層の剛性が低下することにより免震層の変位が大きくなる傾向がみられる。また、履歴減衰の付与により、免震層の絶対加速度応答が増加する傾向がある。これにより建物上部構造への入力加速度が大きくなり、上部構造の応答（建物の層間変形角および設備の絶対加速度）は大きくなる傾向がある。

Table 2-5 および Table 2-6 と Table A-2 の比較より、制御効果については2章で示した結果と層間変形角応答での優劣が建物制御と建物-設備制御で逆転しているものの、その差は層間変位で考えると0.16 mm であり、ほぼ同性能といえる。よって非線形検証モデルに対しても2章で想定した外力の範囲においては概ね線形検証モデルと同様の傾向が得られることが確認された。

## 著者論文目録

### 1. 定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）

- [1] 三浦奈々子, 小檜山雅之：地震時における建物機能維持を目的とした振動制御の二次形式評価関数の設計法，日本建築学会構造系論文集，Vol. 78, No. 687, pp. 923-929, 2013.5
- [2] 三浦奈々子, 小檜山雅之：地震動強度と応答レベルに順応する超高層建物・エレベータ連成系の可変ゲインフィードバック制御，日本建築学会構造系論文集，Vol. 76, No. 670, pp. 2069-2076, 2011.12

### 2. 定期刊行誌掲載論文（その他の論文）

なし

### 3. 国際会議論文（査読付きの full-length papers）

なし

### 4. その他の国際会議発表

- [1] \* Miura Nanako and Kohiyama Masayuki: Vibration Reduction of a Building–Elevator System Considering the Intensity of Earthquake Excitation, *15th World Conference on Earthquake Engineering*, USB Proceedings, Paper No. 278, 2012.9.25, Lisbon, Portugal.
- [2] \* Miura Nanako and Kohiyama Masayuki: Vibration Control Method for a Building Structure-Equipment System to Reduce both Structural and Functional Damages, *9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM Proceedings, Paper No. 09-072, pp. 1473-1478, 2012.3.7, Tokyo, Japan.

### 5. 国内学会発表

- [1] \* 三浦奈々子, 高橋正樹：2層構造セルフパワー・アクティブ免震床，第56回自動制御連合講演会，CD-ROM Proceedings, Paper No. 128, pp. 876-881, 2013.11.17, 新潟。
- [2] \* 三浦奈々子, 高橋正樹：エネルギー最適制御に基づく建物・設備連成系の振動制御，第13回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2013) ,USB Proceedings, Paper No. D15, 2013.8.29, 福岡。
- [3] \* 三浦奈々子, 小檜山雅之：建物-設備連成系に対する建物機能維持を目的とした建物AMDによる振動特性の異なる対象の制御，日本建築学会大会学術講演会，CD-ROM Proceedings, Vol. B-2, pp. 871-872, 2012.9.12, 愛知。
- [4] \* 三浦奈々子, 小檜山雅之：地震動強さと建物応答に順応する可変ゲインを用いた超高層建物・エレベータ連成系の振動制御，日本建築学会大会学術講演会，CD-ROM Proceedings, Vol. B-2, pp. 681-682, 2011.8.23, 東京。

6 . その他

- [1] 三浦奈々子，高橋正樹：エネルギー自己供給型アクティブ振動制御システム，特許出願番号：2013-235743，出願年月日：2013.11.14