

博士論文

脆弱な木造住宅に適用できるセミ
アクティブダンパの開発

Development of a semi-active damper applied
for the weak wooden houses

福岡工業大学大学院
工学研究科 物質生産システム工学専攻
AD16102 足立 孝仁

目次

1 章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	4
1.3 本論文の構成	5
2 章 振動抑制システムの提案	9
2.1 制震デバイスの基本構造と設計	10
2.1.1 ファラデーの電磁誘導の法則	11
2.1.2 制震デバイスの設計	14
2.2 制震デバイスの粘性減衰係数	17
2.2.1 粘性減衰係数の計算	17
2.2.2 接続抵抗を用いた時の粘性減衰係数	18
2.2.3 電気信号で動作したときの粘性減衰係数	23
2.3.4 抵抗と Duty 比との粘性減衰係数の比較	30
2.4 制震デバイスの開発	31
2.5 本章の結論	34
3 章 制震システムの制御系設計	36
3.1 木造住宅の数値モデル化	36
3.2 スライディングモード制御	40
3.2.1 線形系に対するスライディングモード制御理論	40
3.2.2 切換方式	42
3.2.3 到達条件と到達モード	43
3.2.4 制御則	45
3.2.5 スライディングモードの存在条件	48
3.2.6 等価制御法による解析	49
3.2.7 切換超平面の設計	50
3.2.8 スライディングモードコントローラの設計	52
3.3 スライディングモード制御の設計	55
3.3.1 状態空間モデル	55
3.3.2 切換超平面の設計	56
3.3.2 スライディングモードコントローラの設計	57
3.4 本章の結論	58

4章 シミュレーション結果.....	60
4.1 建築構造の耐震設計.....	60
4.1.1 新耐震設計法.....	60
4.1.2 木構造物の層間変形角.....	62
4.2 シミュレーション結果.....	64
4.3 本章の結論	66
5章 実機の検証と倒壊シミュレーションの結果.....	68
5.1 木構造の基本	68
5.1.1 木構造の構法.....	69
5.1.2 接合部の役割.....	72
5.1.3 込栓の性能.....	74
5.2 模擬壁の設計	76
5.3 実験装置の概略図.....	77
5.4 制震デバイスの取り付け角度.....	78
5.5 実験装置の特性測定.....	83
5.6 模擬壁の変位の測定.....	84
5.7 木造住宅の倒壊シミュレーション.....	89
5.7.1 木造住宅倒壊ソフトウェア Wallstat.....	89
5.7.2 木造住宅の設計.....	91
5.7.3 倒壊解析	92
5.8 本章の結論	94
6章 結論	96
付録.....	98
謝辞.....	100
研究業績.....	101

1 章 緒論

1.1 研究背景

近年、日本では地震による影響で建築物の倒壊が多く発生している。この原因の1つに、旧耐震基準の建築物の耐震補強工事が進んでいないことが挙げられる。耐震基準に関する定めは、1978年の宮城県沖地震後に耐震設計法の見直しが行われ、1981年に新耐震設計法が施行された⁽¹⁾。これにより、RC造（鉄筋コンクリート造）を始めとする建築物の基礎強化が行われた。新耐震基準に移行されたことにより、1995年の阪神・淡路大震災では、この基準で建てられた建築物の被害は少なく、一方、旧耐震基準の建築物は倒壊する被害が多く発生した⁽²⁾。阪神・淡路大震災は倒壊被害以外にも、建築物の中間層の崩壊や火災、避難経路の遮断など多くの課題が生まれた。これらの課題を解決するため、既存建築物の耐震改修促進法や建築基準法の改正（限界耐力計算の導入）が施行された⁽³⁾。耐震基準は強化されてきているが、2016年の熊本地震でも同様に建築物の倒壊が多く発生しており、耐震補強工事は進んでいないのが現状である。理由として、建築物の所有者等が地震防災対策の意識が低いなど⁽⁴⁾、充分に進んでいるとは言えない。

全国地震予測地図 2018によると、今後30年間に震度5弱以上の地震が発生する確率は日本領土の8割を占めている⁽⁵⁾。この報告は、日本全国どこにいても地震に遭遇する確率が非常に高いことを示している。そのため、地震による被害を軽減させる制震や免振に関する研究が活発化されている⁽⁶⁾⁻⁽²⁵⁾。

耐震工事には、耐震、制震、免振の3つに大別することができる。耐震は、建物の柱に筋交いを入れることや壁を増やすことで建物全体の耐震強度を上げ、振動を抑制させる方法である。制震は、振動エネルギーを熱エネルギーに変換して振動を抑制させる方法である。免振は、振動を伝える媒体と建物を切り離し、振動を抑制させる方法である。これらの方法から構造物に適した方法を選択して耐震工事を行う。既存の建物に対して補強工事をする際には、耐震か制震を施すことが多い。理由として、免震工事は建物の基礎部分に設置することが基本になるので、それ以外の2つが選ばれることが多くなる。したがって、耐震補強工事には耐震か制震を施すことが一般的になる。ここでは、既存の建物に後から設置することができる制震を用いた振動抑制に注目する。

振動抑制には、パッシブ型とアクティブ型、セミアクティブ型で大別することができる。

パッシブ型は、外部からのエネルギーを必要とせず、地震動で発生する振動をダンパが吸収することで振動を抑制させる。パッシブ型の制震デバイスとしてゴムダンパがある。ゴム

ダンパは、粘弾性のゴムを使用し、振動エネルギーを粘弾性ゴムで熱エネルギーに変換して振動を抑制させるものである。パッシブ型のダンパは、木造住宅の壁への取り付けが容易である。しかし、外部から加えられる振動に応じた減衰力を変えることができない。

アクティブ型は、外部から電気エネルギーを必要とし、そのエネルギーを利用してダンパを制御して振動を抑制させる。アクティブな制震デバイスとしてオイルダンパがある。オイルダンパは、シリンダ内に収めている流体がリリーフ弁を移動することで、熱エネルギーに変換して振動を抑制させるものである。先行研究として、篠原らは、木造家屋を対象に耐力壁とオイルダンパを組み合わせた振動抑制について報告している^{(26),(27)}。このオイルダンパは、シリンダ直径 44mm で最大 7500[N]の力を出すことができる。服部らは、木造住宅の中に新たに独立した柱を立て、その柱にオイルダンパを取り付けたとき、地震応答低減効果について報告している⁽²⁸⁾。丹波は、エネルギー変換装置兼オイルダンパ、蓄積装置のアクキュムレータ、エネルギー再利用する駆動装置で構成されている油圧アクチュエータの開発と性能について報告している⁽²⁹⁾。アクティブダンパは、大型のビルや工場など、免震構造の建物に対して有効なダンパである。しかし、既存の木造住宅は免震構造で建てられていることが少ないので、あとからダンパを取り付けることが難しい、また、オイルの状態を確認するための定期メンテナンスが必要になり、木造住宅のような狭い空間ではメンテナンスを実施することが困難である。

セミアクティブ型は、アクチュエータの減衰力を外部信号により変化させることができ、外部から加わる力に伴って発生する力が変化し、振動を抑制させる方法である⁽³⁰⁾。セミアクティブな制震デバイスとして MR ダンパがある。MR ダンパは、シリンダ内の電磁レオロジー流体に電場を与えることで減衰力を変え、振動抑制させる。先行研究として、沈らは、鉄骨フレームに設置することができる小型の MR ダンパの開発と制御について報告している⁽³¹⁾。この MR ダンパは、ファジィ制御で動作させることを可能とし、重さ 4.6[kg]、サイズは高さ 101[mm]、横幅 291[mm]で、最大 100[N]の力を出すために電力を約 36[W]消費する。富澤らは MR ダンパに回転慣性質量ダンパを用いたときの性能試験について報告している⁽³²⁾。これらの MR ダンパは、免震構造で建てられた大型建築物や新築の家屋で応用されている。しかし、既存の木造住宅は免震構造ではない建築物が多いので、このデバイスを後からの取り付けは難しい。また、MR ダンパは、主にマンションのような大型建築物や新築の家屋で応用されているが、既存の木造住宅に取り付ける研究は行われていない。

その他の制震デバイスには、ボイスコイルを用いたアクティブなダンパもある。これは、振動エネルギーを電気エネルギーと熱エネルギーに変換して振動を抑制させる方法である。

ボイスコイルを用いた制震デバイスは、自動車への応用⁽³³⁾のみで家屋への応用例は見当たらない。また、モータを利用した回転錘式の制震デバイス⁽³⁴⁾もあるが、これも高層ビルやマンションでのみ応用されている。

それらセミアクティブな制震システムは、RC造（鉄筋コンクリート構造）や免震構造物といった大型で堅牢な建築物への応用であり、木構造物の中でも狭小で脆弱な木造家屋への応用している例は見当たらない。なぜなら、狭小な木造住宅は、制震デバイスを取り付けるスペースが限られていることが、その理由の一つとして考えられる。また、MRダンパ等の制震デバイスは大型建築物であれば大きな減衰力を適切に発揮できるが、脆弱な木造住宅の一部に強固な減衰力を持つ制震デバイスが備わると、制震デバイスの重さや壁を完全に固定するほどの大きな力が影響して、柱や壁にねじれが生じる可能性がある⁽³⁵⁾、⁽³⁶⁾。これらの住宅は都内に点在しており、もしも地震によって倒壊するようなことが起きれば、住人に被害が及ぶことと瓦礫により緊急車両の通行や避難経路の妨げになる可能性がある。

以上のことより、狭小で脆弱な木造住宅に取り付ける制震デバイスには、小型で安価であり、力を適度に分散できるデバイスが有効であると考えられる。したがって、この住宅の倒壊を防ぐための制震デバイスを開発するためには、新しいデバイスの概念と技術の導入が必要である。

1.2 研究目的

本研究は、「脆弱な木造住宅の長屋に取り付けることができ、安価で小型な直線動作型セミアクティブ制震デバイスを開発すること」を目的としたものである。そこで、本研究は上記の研究目的に従い、次の3つの課題に取り組む。

- (1) 脆弱な木造住宅に取り付けるための制震デバイスを設計する。
- (2) 粘性減衰係数と Duty 比との関係を明らかにし、電子制御可能な制震デバイスを設計する。
- (3) 木造住宅に与えられる地震動を収束させる制御系を設計する。

上記(1)の課題については、直線動作型発電装置を制震デバイスとして利用するため、有限要素法解析ソフト ANSYS を用いてシミュレーションを行い、単純構造で小型の制震デバイスを設計・開発する。直線動作型発電装置は、磁石とコイルで構成され、磁石が往復運動すると磁束が変化し、コイルに誘導起電力が発生するものである。この起電力が働くと減衰力が働き、起電力の大きさに減衰力の大きさが決定される。ここでは、大きな起電力が発生するパラメータについて記述する。

上記(2)の課題については、(1)で開発した制震デバイスの粘性減衰係数を算出し、Duty 比と粘性減衰係数の特性を明らかにする。設計した制震デバイスは、誘導起電力で発生した電流を PWM 信号で電子制御することができる。ここでは、電子制御するための電子デバイスの設計と粘性減衰係数の特性について記述する。

上記(3)の課題については、スライディングモード制御に基づいて制御系を設計し、実験結果から設計した制御系の有効性について明らかにする。ここでは、住宅モデルの壁を模擬した実験装置に制御系を適用したとき、実験装置の変位について記述する。

1.3 本論文の構成

本論文は次の 6 つの章から構成される。

第 1 章では、近年の制震技術と問題点について触れ、本研究の目的について記述した。

第 2 章では、開発する制震デバイスの構造と粘性減衰係数の特性について記述している。具体的には、制震デバイスのコイルに流れる電流を制御する PWM 信号と粘性減衰係数の関係について明らかにしている。

第 3 章では、スライディングモード制御に基づいて設計した制御システムについて記述している。木造住宅をモデル化し、振動抑制をさせるために設計した制御則について述べている。

第 4 章では、第 3 章で設計した制御システムのシミュレーション結果について記述している。具体的には、木造住宅のモデルに提案の制御システムを適用し、このモデルに地震動を加えたときの結果を示している。

第 5 章では、提案の制震デバイスを木造住宅の壁を模擬した木枠に取り付けた場合において、振動特性の実験結果を記述している。ここでは、提案システムを用いた制御の有無について振動特性を比較することで、その有効性を確認している。

第 6 章では、本研究の結果を纏めるとともに、今後の方向性について記述している。

以上が本論文の本編である。

参考文献

- (1) 石山祐二：「建築構造を知るための基礎知識 耐震規定と構造力学」，三和書籍
- (2) 神戸市：「阪神・淡路大震災の概要及び復興」，<http://www.city.kobe.lg.jp/safety/hanshinawaji/revival/promote/img/honbun.pdf>
- (3) 国土交通省：「建造物の耐震診断及び耐震改修の促進を図るための基本的な方針」，
<http://www.mlit.go.jp/common/001020211.pdf>
- (4) 国土交通省，“建築物の耐震診断及び耐震改修の促進を図るための基本的な方針”，平成30年国土交通省告示第1381号，5/6(2018)
- (5) 地震調査研究推進本部事務局(文部科学省研究開発局地震・防災研究課)：全国地震動予測地図2018年版，https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2018/ (2018)
- (6) 満田衛資，大淵允紀，辻 聖晃，竹脇 出：連結制振構法を用いた建物の固有振動および減衰に関する基本特性，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.696，pp.227-236，2014
- (7) 坂口和夫，竹脇 出：地盤剛性を考慮した連結制振建物モデルへの地震エネルギーの入力メカニズム，日本建築学会構造系論文集，Vol.80，No.707，pp.69-79，2015
- (8) A Gonzalez-Buelga, L R Clare, S A Neild1, J Z Jiang and D J Inman, "An electromagnetic inerter-based vibration suppression device", *Smart Materials and Structures*, Vol.24, No.5, pp.1-10, 2015
- (9) 佐藤孝典，堀江竜巳，邵 立，西村拓也：粘弾性ダンパーを用いた細柱制震構造とその設計法の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol.66，No.543，pp.45-50，2001
- (10) 渡辺泰成，佐藤利昭，北村春幸，佐藤大樹，宮川和明，植木卓也，村上行夫：中低層鋼構造制振建物を対象とした高強度鋼の有効性と耐震性能の評価，日本建築学会技術報告書，Vol.22，No.52，pp.909-914，2016
- (11) 友澤裕介，岩崎良二，高田毅士：制振効果を最大化する連結特性の特定，日本建築学会技術報告書，Vol.73，No.631，pp.1529-1534，2008
- (12) 中南滋樹，木田英範，平田裕一，鈴木 亨，田中久也：定点理論に基づく多段調整バネ付き粘性マスダンパーの応答制御法，三井住友建設技術研究所報告，Vol.6，pp.153-160，2008
- (13) 佐野泰之，成瀬治興，林 健太郎：RC 建築構造物における振動伝搬性状に関する模型実験-実構造物加振実験と模型構造物加振実験との対応について-，日本建築学会計画系論文集，Vol.67，No.561，pp.1-6，2002
- (14) 西原修：二重動吸振器の最大振幅倍率最小化設計（並列型および直列型における最適性規準法の適用），日本機械学会論文集，Vol.83，No.849，pp.1-12，2017
- (15) Agathoklis Giaralis , Laurentiu Marian , "Vibration suppression and energy harvesting in tuned mass-damper-inerter (TMDI) equipped harmonically support-excited structures", 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, pp.3038-3047, 2014

- (16) 岡崎友也, 五十田 博, 小塚直人, 若島嘉朗: 家具類の地震時挙動と有効質量に関する実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.646, pp.2199-2208, 2009
- (17) 中川貴文, 河合直人, 岡部 実: 既存木造住宅の基礎の耐震補強構法の補強効果に関する研究 その 1 布基礎の曲げ試験, 日本建築学会技術報告集, Vol.17, No.35, pp.113-116, 2011
- (18) 荒木康弘, 腰原幹雄, 大橋好光, 坂本 功: 木造住宅の地震応答解析のための復元力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.69, No.579, 2004
- (19) 福喜多 輝, 高橋正樹: 長周期地震動を受ける免震構造物の応答評価に基づくセミアクティブ制御, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.77, No.777, pp.1649-1660, 2011
- (20) 向出静司, 村上友規, 多田元英: 魚骨形骨組による鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.690, pp.1523-1532, 2013
- (21) 長島一郎, 篠崎洋三, 欄木龍大, 讃井洋一, 北川良和: 可変減衰オイルダンパーを用いた免震構造物のスライディングモード制御, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.649, pp.511-519, 2010
- (22) 大貫 修, 野波健蔵, 西村秀和, 有我祐一: センサレスアクティブ動吸振器による多自由度構造物のスライディングモード制御, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.63, No.606, pp.328-334, 1997
- (23) 上半文昭, 目黒公郎: 応用要素法による鋼板補強 RC 構造物の 2 次元解析モデルとその損傷度把握への応用, 生産研究, Vol.52, No.12, pp.606-609, 2000
- (24) 新城季樹, 池永昌容, 五十子 幸樹, 井上範夫: 集中配置時における多質点系同調粘性マスダンパー制振システムの最適応答制御, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.715, pp.1393-1402, 2015
- (25) 金子 健作: 地震動の経時特性および周期特性を考慮した同調質量ダンパーの応答指定型設計法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.730, pp.2057-2067, 2016
- (26) 篠原昌寿, 五十嵐博, 岡崎 淳, 石本篤史, 宮澤健二, 御子柴正: オイルダンパーを組み込んだ 2 層木質架構の振動台実験, 日本建築学会技術報告集, Vol.16, No.32, pp.126-128, 2010
- (27) 篠原昌寿, 五十田博, 清水秀丸: オイルダンパーを付加した木質ラーメン構造の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.729, pp.1859-1868, 2016
- (28) 服部理紗, 辻 聖晃: 鋼製独立柱とのダンパー連結による木造住宅の耐震性能向上法 (2 階補強と併用する場合の設計手順), 鋼構造論文集, Vol.24, No.94, pp.23-34, 2017
- (29) 丹羽 直幹: 油圧機構の動特性に基づくエネルギー変換アクティブ制震システムの特性評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.746, 537 / 546 (2018)
- (30) 森下 信: セミアクティブ制振システム, 計測と制御, Vol. 37, No. 8, 541 / 545 (1998)
- (31) 沈 里通, 荻野和臣, 曾田五月也: MR ダンパを設置した小型 3 層免震フレームのセミアクティブ振動制御実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.72, No.617, pp.63-70 (2007)
- (32) 富澤徹弥, 高橋 治, 藤谷秀雄, 柴田和彦, 佐藤友祐: 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの性能試験とその解析的検証, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.693, pp.1859-1867, 2013
- (33) 加藤英晃, 増野将大, 石田勝樹, 長谷川真也, 押野谷康雄: 超小型電気自動車用アクティブシートサスペンション—筋電位を用いた乗り心地評価に関する基礎的検討—, 日本 AEM 学会誌, Vol.23, No.1, pp.75-79, 2015

- (34) 西村秀和, 野波健蔵, 中田 修: アクティブ動吸振器による多自由度構造物の極配置領域指定 H_{∞} 制御, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.61, No.584, pp.87-94, 1995
- (35) H. Noguchi, W. Ohura, S. Yoshida, H. Kajikawa and M. Kobayashi, "EARTHQUAKE RESPONSE CONTROL OF TIMBER STRUCTURE WITH UNBALANCED DISTRIBUTION OF SHEAR WALLS UTILIZING VISCOELASTIC DAMPER Shaking table test with three-dimensional mode and analysis of response mechanism", J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.600, 123 / 130 (2006)
- (36) Y. Yamazaki, H. Sakata and K. Kasai, "SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION FOR ONE STORY TIMBER STRUCTURE WITH UNI-AXIAL ECCENTRICITY Displacement mode prediction method for torsionally coupled vibration due to strength eccentricity and proposal of seismic performance index", J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 78, No.687, 959 / 968 (2013)

2 章 振動抑制システムの提案

本章では、本論文で提案する直線動作型制震デバイスの基本構造と特性について述べる。

提案する制震システムは、耐震強度の弱い木造住宅に適用できるシステムを考えている。提案する制震システムの構成図を図 2-1 に示す。図より、木造住宅に入力される地震動をセンサで検知し、コントローラに加速度の信号を送る。コントローラで加速度を速度に変換し、この速度に応じた必要な減衰力の信号を制震デバイスに送り、木造住宅の振動を抑制する。このような流れで、提案する制震システムは、地震動の大きさに応じて減衰力をセミアクティブに変化させて振動を抑制させる。

本章の前半では、提案する制震デバイスの基本構造について述べる。この制震デバイスは、直線動作で振動を抑制させる構造をし、磁石とコイルで構成している。コイルの巻く幅や線の太さなど、減衰力が大きく得られる値を設計することが課題となる。

本章の後半では、提案する制震デバイスの粘性減衰係数の特性について述べる。このデバイスは、磁石が直線動作するとファラデーの電磁誘導の法則でコイル内に起電力が働く。この起電力の発生で、コイル内に流れる電流の大きさが変化すると、減衰力の大きさも変化する。制震デバイスの減衰力を電子制御できる範囲を知ることが課題となる。

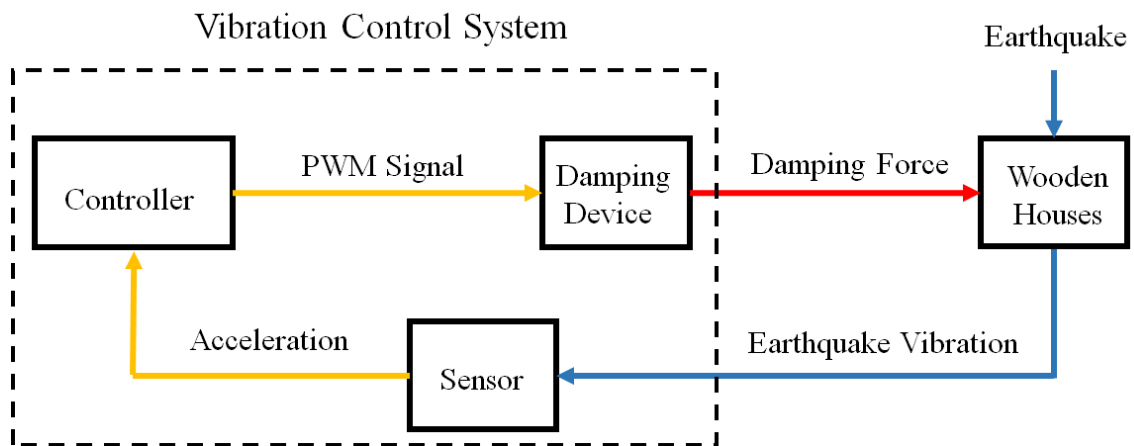


図 2-1 制震システムの構成図

2.1 制震デバイスの基本構造と設計

一般的な制震デバイスは、建物に加わる振動エネルギーを熱エネルギーに変換して振動を抑制させるものである。提案する制震デバイスは、直線動作型発電装置をアクチュエータとして利用する。直線動作型発電装置は、振動エネルギーを電気エネルギーに変換させることができる⁽¹⁾。この装置を制震デバイスに利用すると、建物に加わる振動エネルギーを熱エネルギーと電気エネルギーに変換して振動を抑制させることができる。提案するデバイスの基本構成を図2-2に示す。このデバイスは円筒状であり、外側に固定子のコイル、内側に移動子の磁石で構成されている。固定子のコイルは、互いの電圧を高めるために隣同士で逆方向に巻かれている。移動子は保持力の大きなネオジム磁石であり、磁束の変化を大きくするために、同極同士を向かい合わせに配置されている棒磁石になっている。移動子がコイル内を直線運動すると、ファラデーの電磁誘導の法則から誘導起電力が発生する。コイルを貫く磁束の変化する方向が変わるので、起電力には交流が発生する。コイルに負荷が接続されていると、流れる電流により移動子の動きを妨げる力（減衰力）が働く。この力は、コイルに流れる電流の大きさにより変化する。したがって、コイルの両端につなげる負荷を変化させることで、移動子の進行方向に対しての減衰力を調整することができる。

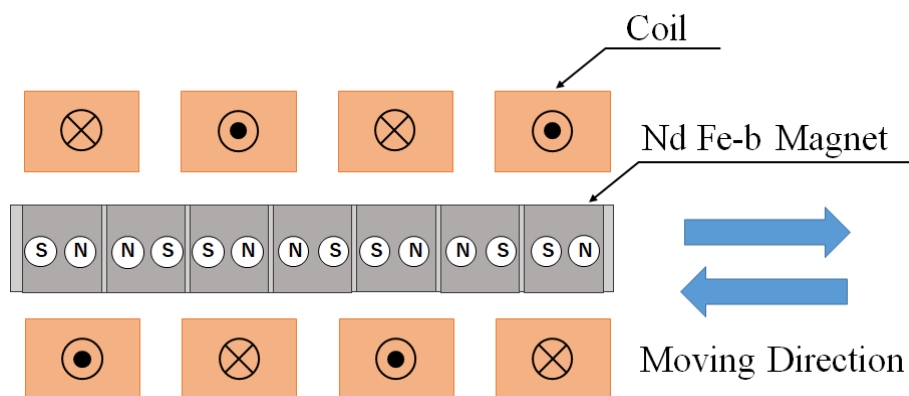


図 2-2 制震デバイスの基本構造

2.1.1 ファラデーの電磁誘導の法則⁽²⁾

提案する制震デバイスは、ファラデーの電磁誘導の法則に基づいた発電装置を振動抑制として応用したものである。ここでは、ファラデーの電磁誘導の法則について記述する。

ファラデーは、1831年に閉じた導線回路の近くに磁石を置き、これを動かすことで回路内に電流の生ずることを発見した。図 2-3 にファラデーの電磁誘導の法則の概略図を示す。この図は、真空中の閉曲線 C 上に点電荷 e をもってくる、 C によって囲まれる磁束の時間的变化により発生する電場 \mathbf{E} により、点電荷には $\mathbf{F} = e\mathbf{E}$ の力が作用する。この力の作用のもとに、点電荷が閉曲線 C を1周するとき、外部になすことのできる仕事の量は、

$$e \oint_C \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{r}$$

に等しい。ここで積分は図 2-3 にみられるように、閉回路を時計と逆向きに一周する線積分である。一方、起電力 φ に e をかけたものがこの仕事に等しい。起電力は

$$\varphi = \oint_C \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{r} \quad (2.1)$$

と表される。

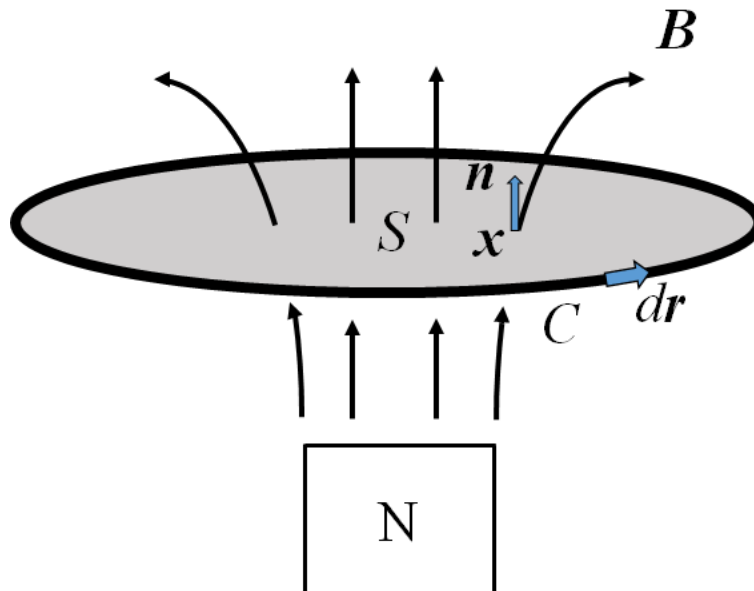


図 2-3 電磁誘導の法則

磁束は、閉曲線により囲まれる任意の曲面 S 上の表面積分で表されて、

$$N = \oint_S \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS \quad (2.2)$$

となる。 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ は曲面 S に図 2-3 のように立てた単位法線ベクトルである。磁束を式 (2.2) のように表すとき、閉曲線 C に囲まれた任意の曲面をとってもよいことは、

$$\oint_S \mathbf{B}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS = 0$$

の閉曲面 S を 2 つの曲面 S_1 と S_2 に分解することによって、

$$\oint_S \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS = \int_{S_1} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}_1(\mathbf{x}) dS - \int_{S_2} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}_2(\mathbf{x}) dS = 0 \quad (2.3)$$

の関係が成立する。ただし、ここで S_2 面上では $\mathbf{n}_2 = -\mathbf{n}$ とした。

ここで、起電力と磁束の関係を整理すると、

$$\oint_C \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{r} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS \quad (2.4)$$

ストークスの定理により、左辺は、

$$\oint_C \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{r} = \int_S \text{rot } \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS$$

と書き換えられるから、

$$\int_S \text{rot } \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS \quad (2.5)$$

いま考えている真空中の曲面 S を固定すると、右辺の積分領域は時間とともに変わることはないので、その時間的变化は $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ のなかの t のみにより与えられる。そこで、

$$-\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS \quad (2.6)$$

式 (2.5) と式 (2.6) から

$$\int_S \left(\text{rot } \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) + \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \right) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) dS = 0 \quad (2.7)$$

ここで積分領域は真空中に任意にとることができるので、式 (2.7) が常に成立するためには、被積分関数が 0 でなければならない。そこで、

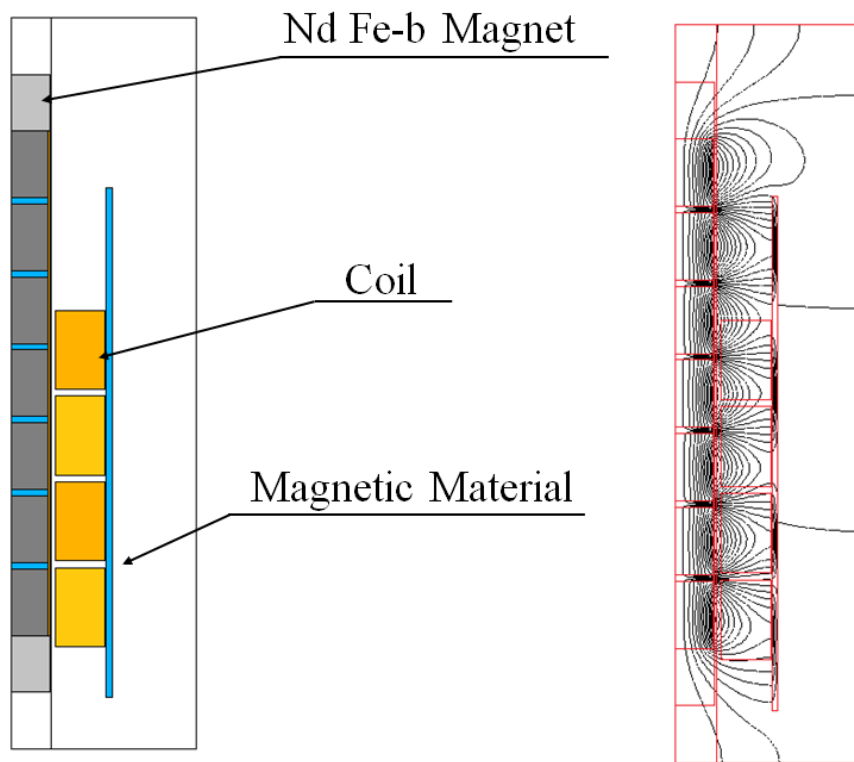
$$\operatorname{rot} \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) + \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.8)$$

が得られる。これが近接作用の立場にかなった、微分形式におけるファラデーの電磁誘導の法則である。

2.1.2 制震デバイスの設計

制震デバイスの減衰力は、誘導起電力の大きさに依存している。そのため、誘導起電力が大きく発生することができれば、減衰力が大きく発生させることができる。制震デバイスの設計には、有限要素法解析ソフトウェア ANSYS (CYBERNET SYSTEMS Co. Ltd.) を使用し、コイルの溝幅や線の太さ等のパラメータを磁場-構造解析から決めた。設計の流れは、作成したモデルの磁場解析を行い、ここで得られる吸引力を構造解析に反映させ、減衰振動から粘性減衰係数を求めた。ここでは、固定子のコイルは断面積 $1360 \text{ [mm}^2\text{]}$ の中に銅線 $\Phi 0.5 \text{ [mm]}$ が 1 層当たり 460 回巻きでパラメータを設定した。また、移動子の磁石は、直径 25 [mm] 、長さ 200 [mm] で、 2 [mm] 間隔で 7 個のネオジム磁石の同極同士が向かい合うように配置し、磁石の保磁力は 796 [kA/m] と設定した。さらに外側には、磁束をコイルの外側まで広げるため磁性体を設定した。

コイルを巻くための溝の深さを決めるため、上述したパラメータでモデルを作成した。溝の深さは、 $20 \sim 40 \text{ [mm]}$ の幅で解析を行なった。ANSYS 上で作成した制震デバイスのモデル図を図 2-4 (a) に示す。この図は、二次元の対象軸でモデル化し、移動子の磁石と固定子のコイル、磁性体の要素をそれぞれのエリアに当てはめている。図 2-4 (b) は、これらのパラメータで磁場解析した結果を示す。磁石から出ている磁束は、磁性体の中で閉じ込められ、コイルの外側まで磁束が広がっていることが分かる。次に、吸引力を求めるための準備として、このモデルに電気回路を挿入する。電気回路を挿入したモデルを図 2-5 に示す。この電気回路は、コイルの要素 (内部抵抗と巻き方向) と接続抵抗を直列に接続したものである。接続抵抗を変えることで電流の大きさが変化する。最後に、移動子のエリアのみを 0.001 [s] 間隔で微小に移動させたときで解析する。この解析で、移動子の変位を自由振動させたとき、制震デバイスの粘性減衰係数を求めていく。結果を図 2-6 に示す。結果より、コイルの幅を 32 mm のとき、粘性減衰係数の値が大きくなっている。したがって、制震デバイスのコイルの巻く溝の深さを 32 mm に決定した。



(a) The axisymmetric model

(b) The magnetic field

図 2-4 制震デバイスの磁場解析

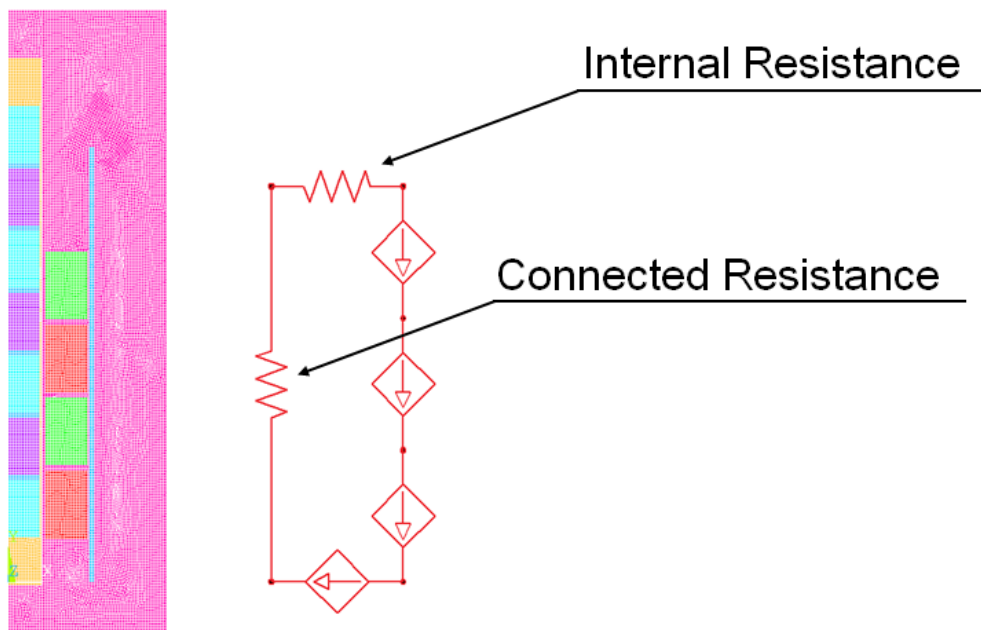


図 2-5 モデルへの電気回路の挿入

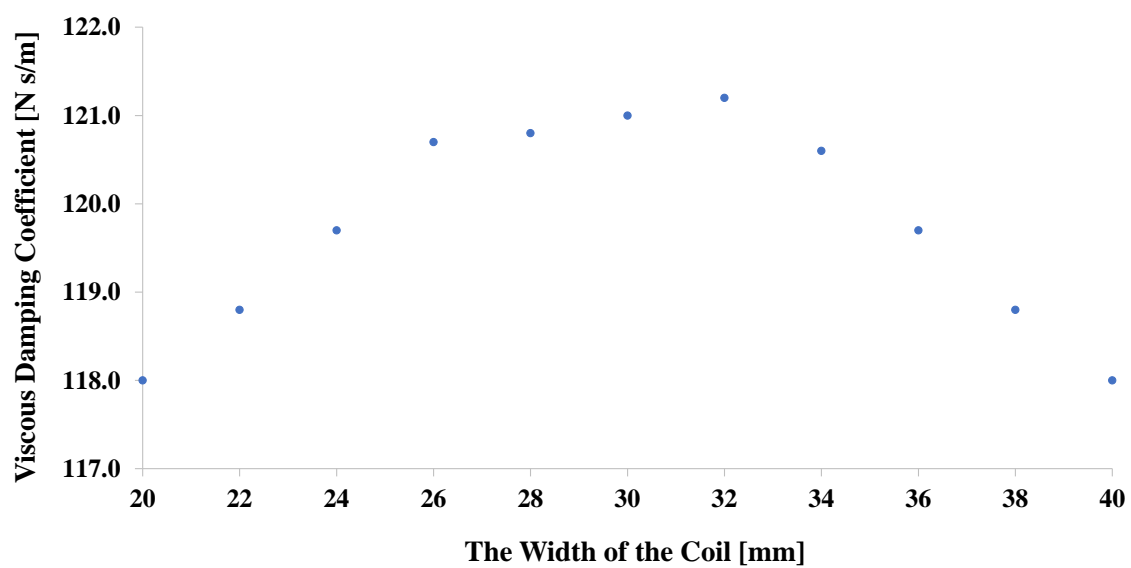


図 2-6 コイルの溝の深さを変えたときの粘性減衰係数の結果

2.2 制震デバイスの粘性減衰係数

本研究で使用する制震デバイスは、先述した通り、誘導起電力の大きさに応じた減衰力が発生する。誘導起電力で発生した電流がコイル内に流れる大きさが変化すると、減衰力も同様に变化する。したがって、コイル内に流れる電流を変えることで減衰力を変えることができる。

電流の大きさを変える方法に、コイルの両端に接続する負荷を変えることで電流の大きさを変えることができる。しかし、実際に壁の中に制震デバイスを取り付ける場合、振動に応じて負荷を毎回切り替えるのは現実的ではない。そこで、スイッチング素子を応用して電気信号でコイル内に流れる電流の大きさを変えられる電子回路を提案する。ここでは、接続抵抗と粘性減衰係数の特性と、電気信号で動作した場合の粘性減衰係数の特性を述べる。

2.2.1 粘性減衰係数の計算

粘性減衰係数は、減衰力に関する要素である。この要素は、ばね定数や質量のように計測器を用いて直接測定することが困難である。ここでは、粘性減衰係数は対数減衰率で求めた⁽³⁾。減衰自由振動の波形は、図 2-7 のように指数関数的に減衰する。この波形の隣り合う振幅の比を自然対数で計算したものが対数減衰率 ζ_l といい、次式のように記述される。

$$\zeta_l = \ln \frac{a_0}{a_1} = \ln \frac{a_1}{a_2} = \dots = \ln \frac{a_{n-1}}{a_n} \quad (2.9)$$

ここで、 a_0, a_1, \dots, a_n は時刻 t_n の振幅とする。 ζ_l の精度を上げるため n 周期分を考えると、

$$\zeta_l = \frac{1}{2\pi n} \ln \left(\frac{a_0}{a_1} \times \frac{a_1}{a_2} \times \dots \times \frac{a_{n-1}}{a_n} \right) = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{a_0}{a_n} \quad (2.10)$$

となる。したがって、粘性減衰係数 c は、対数減衰率 ζ_l と臨界減衰係数 c_c で表すと次式のように記述される。

$$c = \zeta_l c_c \quad (2.11)$$

$$c_c = 2m\omega_n \quad (2.12)$$

ここで、 ω_n は固有角振動とする。

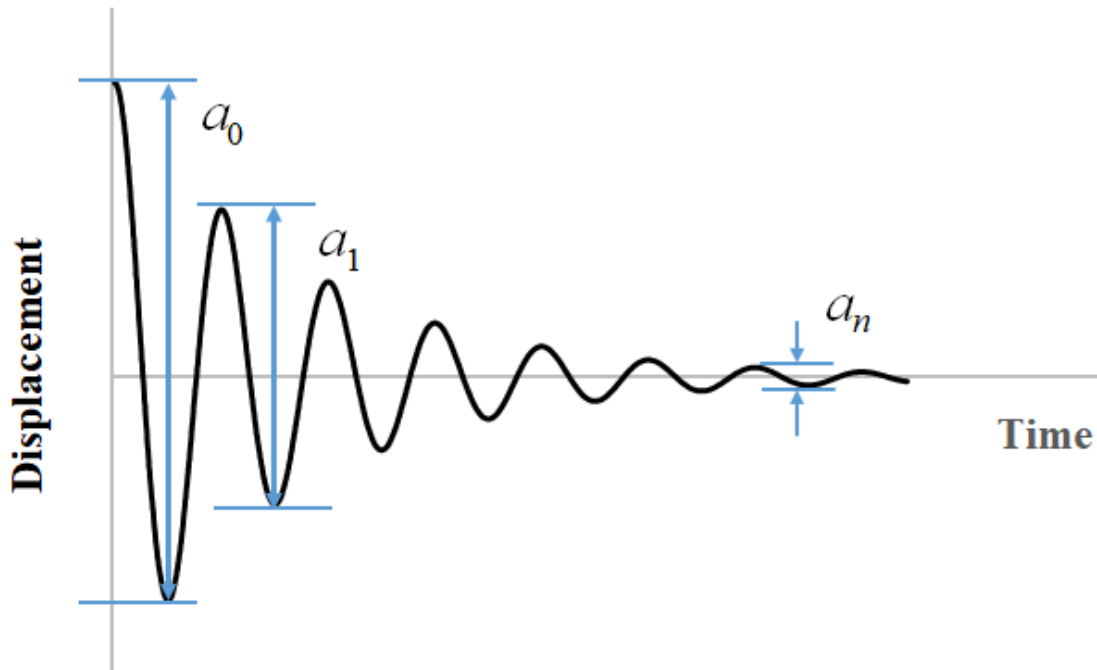


図 2-7 減衰自由振動と対数減衰率の関係

2.2.2 接続抵抗を用いた時の粘性減衰係数

制震デバイスのコイルに流れる電流の大きさは、コイルの両端に接続する負荷抵抗の大きさによって変えることができる。これは、コイル内に流れる電流の大きさが電磁力の大きさが変わるからである。電磁力 F は、次のように記述される。

$$F = iBl \sin \theta = \frac{(Bl)^2}{R} \sin \theta \quad (2.13)$$

i はコイルに流れる電流、 B は磁束密度、 l はコイルの長さ、 $\sin \theta$ は磁束と電流の偏角、 R は抵抗とした。ここで、偏角は $\theta = \frac{\pi}{2}$ の理想的な角度として扱くと、

$$F = iBl = \frac{(Bl)^2}{R} \quad (2.14)$$

となる。式 (2.14) より、抵抗が小さくなれば電磁力が大きくなるのが分かる。以上のことより、コイルに接続する負荷抵抗を変えることで減衰力を変えることができる。

制震デバイスに負荷抵抗を接続した際に減衰振動を測定する。この減衰振動の収束時間から粘性減衰係数を計算で求め、負荷抵抗と粘性減衰係数の関係を明らかにする。図 2-8 に実験装置を示す。この装置は、バネ-マス-ダンパの 1 質点 1 自由度系をモデルにしている。重りとバネは市販されている物を使用し、ダンパ部分は制震デバイスを入れた。測定方法は、コイルの両端の接続抵抗を変え、静かに重りを天板に落とした時の変位 x を測定し、式 (2.11)、

(2.12), (2.13) を用いて粘性減衰係数を求める。変位は、ポテンシオメータ (MIDORI PRECISIONS : LP-50FJ) を使用した。ここで、重り $m = 15$ [kg], ばね定数 $k = 6584$ [N/m], 固有周波数 3 [Hz] とした。固有振動は、短周期地震動を想定して設定した。外側の磁性体を外した状態の制震デバイスの測定結果を図 2-9~図 2-13 に示す。この図は、接続抵抗 0 [Ω] (短絡), 1 [Ω], 10 [Ω], 51 [Ω], 100 [Ω] の順に測定結果を示している。

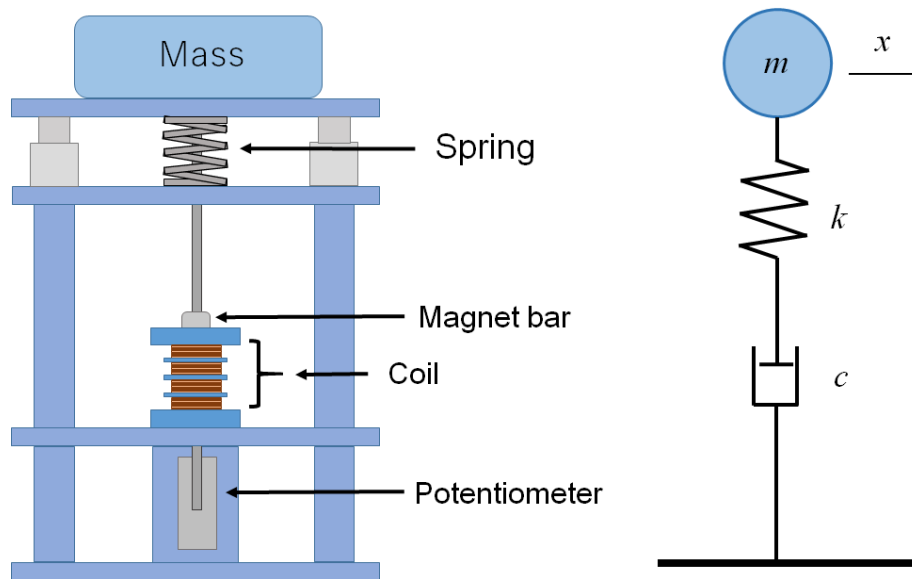


図 2-8 1 質点 1 自由度形の実験装置

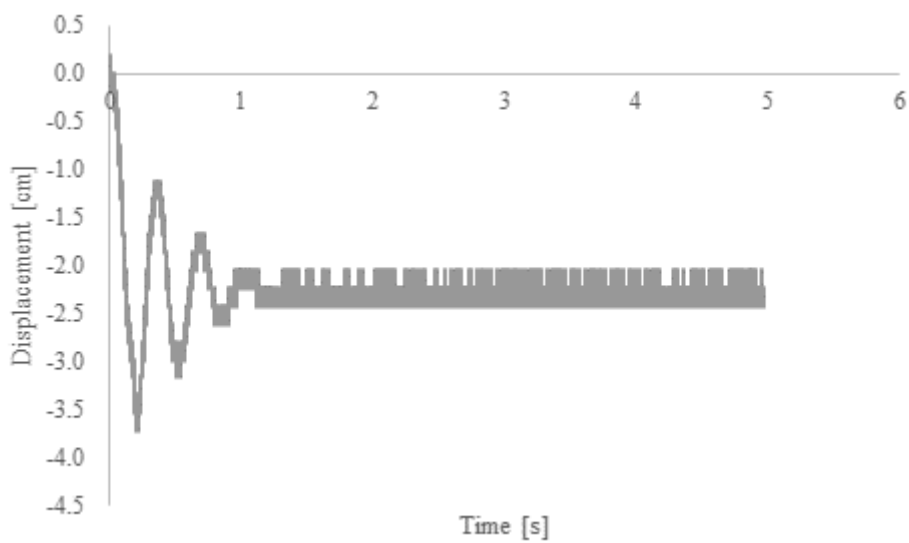


図 2-9 抵抗 0 [Ω] (短絡時) の変位

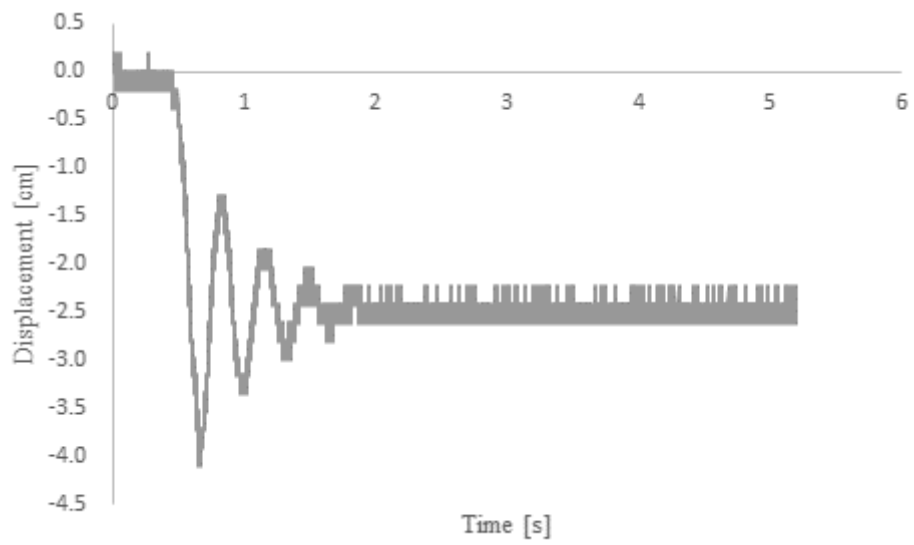


図 2-10 抵抗 1Ω の変位

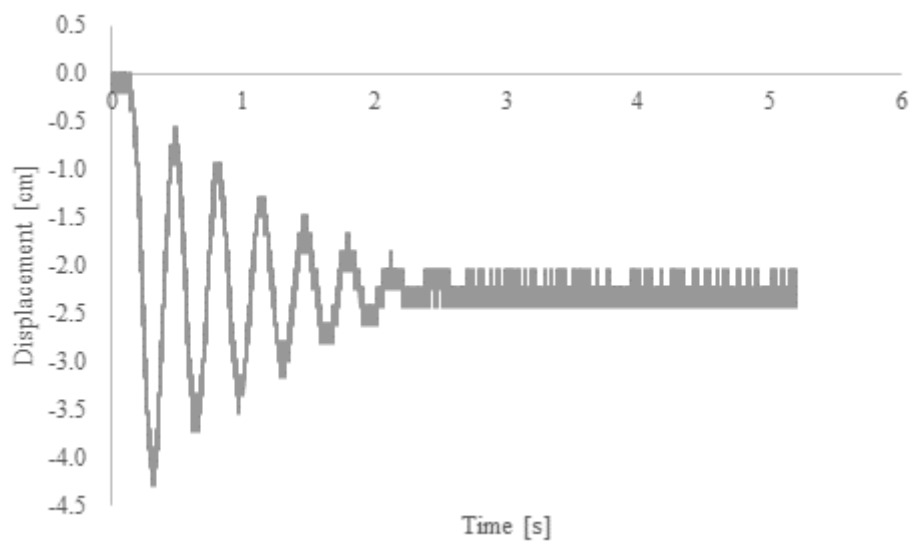


図 2-11 抵抗 10 [Ω] の変位

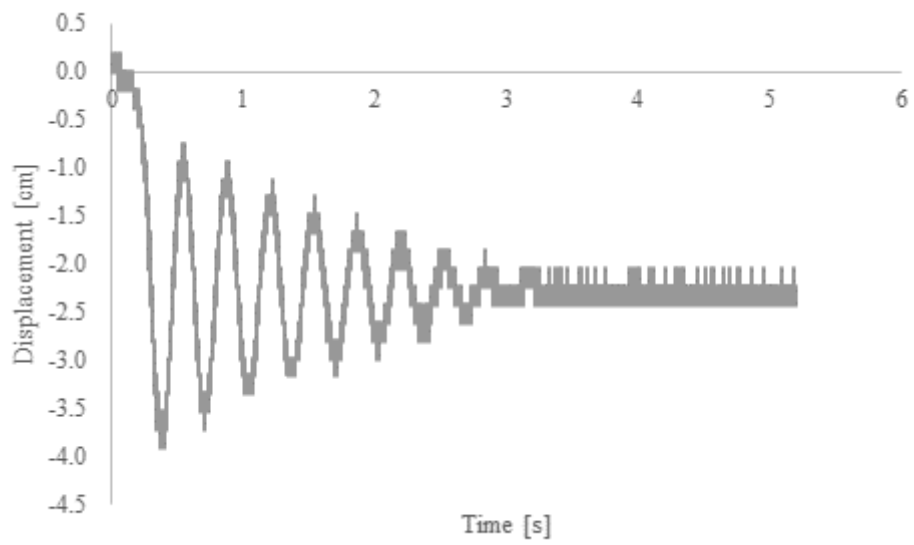


図 2-12 抵抗 50 [Ω] の変位

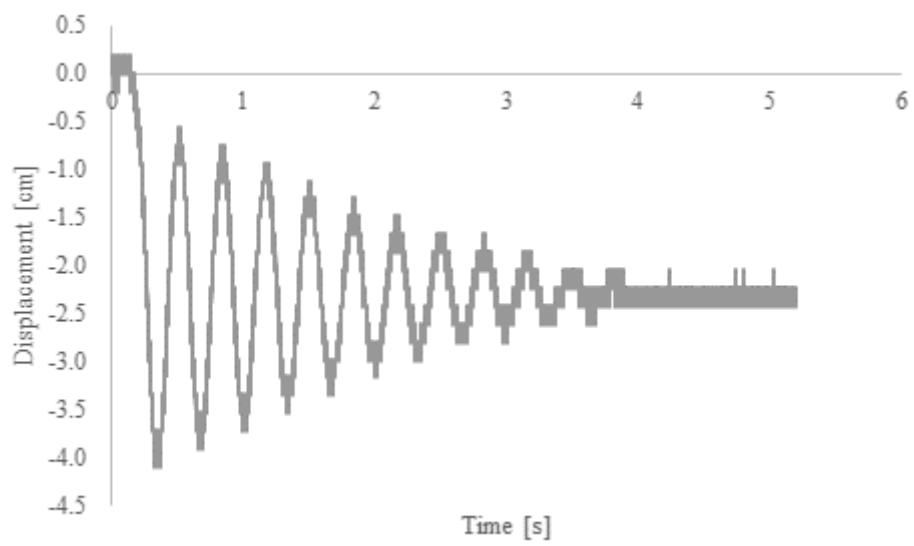


図 2-13 抵抗 100 [Ω] の変位

接続している負荷抵抗の値が大きくなると、振動が収束するまでの時間が長くなっていることがわかる。各抵抗の粘性減衰係数の結果を図 2-14 に示す。図 2-14 より、粘性減衰係数の最大値は、抵抗 0 $[\Omega]$ (短絡時) のときで約 120 $[\text{N s/m}]$ となった。また、粘性減衰係数の最小値は、100 $[\Omega]$ のときで約 30 $[\text{N s/m}]$ となった。したがって、粘性減衰係数は負荷抵抗の値が小さくなればなるほど大きな値になることが確認できた。また、負荷抵抗と粘性減衰係数の関係図は、反比例の概形を描いていることが確認できた。

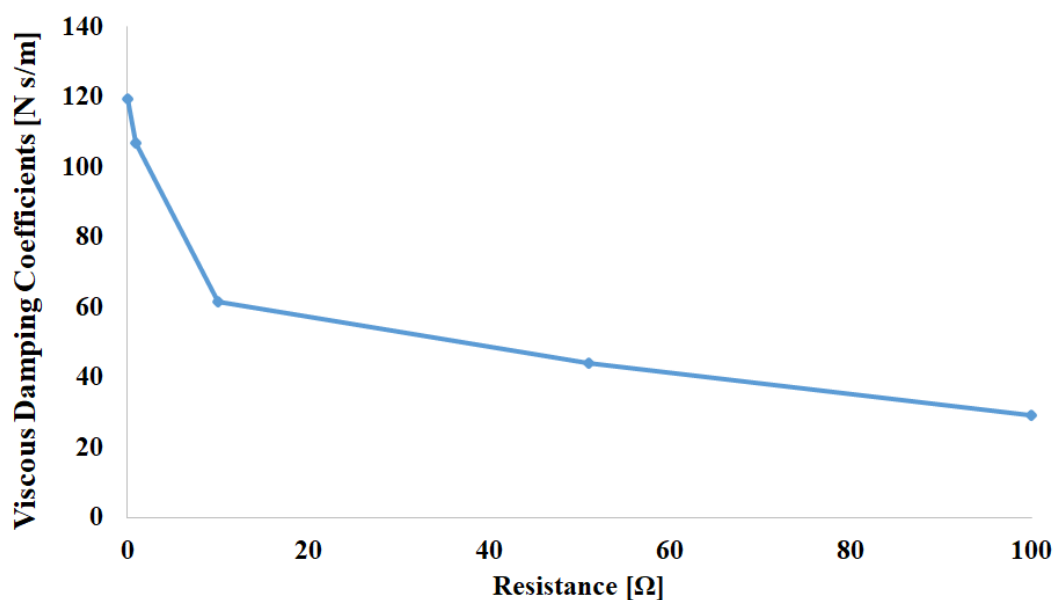


図 2-14 接続抵抗と粘性減衰係数の特性

2.2.3 電気信号で動作したときの粘性減衰係数

前述したコイルの両端に接続抵抗を変える方法では、瞬時に粘性減衰係数を切り替えるときには向いていない。そこで、接続抵抗によって電流を変化させていた部分を、外部信号により操作可能な双方向スイッチと抵抗を接続し、スイッチのオン・オフにより制震デバイスに流れる電流値を変化させることにした。図 2-15 に制震デバイスの粘性減衰係数を変えるための電子回路を示す。この回路は、双方向スイッチ回路と駆動回路で構成している。双方向スイッチ回路は、2つの MOSFET (IRFB4020) を使用し、PWM 信号を2つのゲートに同時に送ることで、コイル内に流れる電流の大きさを変えることができる。制震デバイスから出力される起電力が交流なので、双方向スイッチを用いている。駆動回路は、フォトカプラ (TLP358H) に外部電源を供給し、MOSFET のゲート電圧を高めるために使用している。この FET のオン・オフさせる信号には PWM 信号を用いた。PWM 信号は、1 周期のパルスの ON 時間 (Duty 比) を変えることで出力電圧の平均値を変えることができるので、抵抗に流れる電流も変化することになる。FET に PWM 信号を入力するだけなので、消費電力は小さい。このシステムでは、FET を駆動するのに必要な最大電力は 185 [mW] であり、マイコンの消費電力と合わせても極めて小さい消費電力で制震デバイスを動かすことができる。したがって、既存のデバイスと比べて制震デバイスを駆動させるための電力を非常に小さくすることができる。

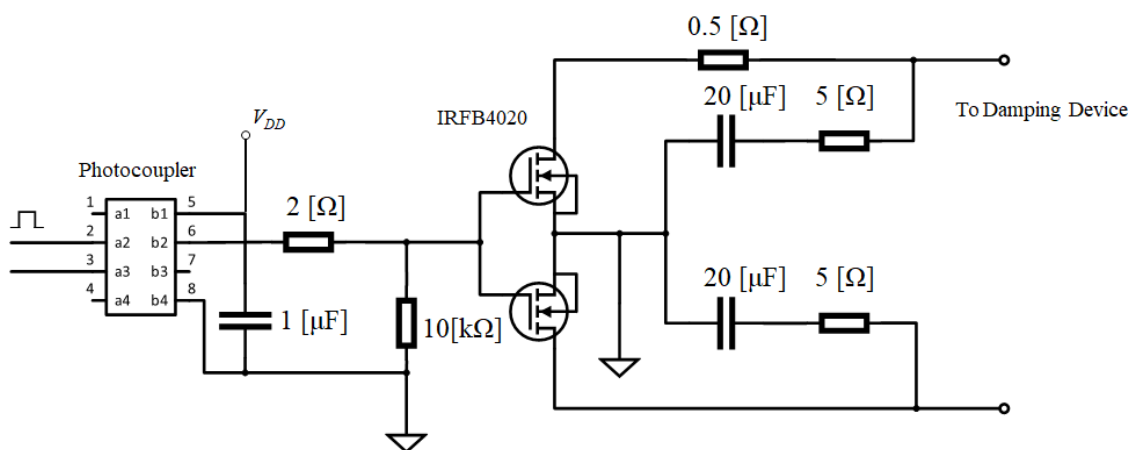


図 2-15 双方向スイッチを用いた駆動回路

負荷抵抗で測定した際の実験装置を用い、PWM 信号の Duty 比を変えて減衰振動を測定する。負荷抵抗のときと同様に、減衰振動の収束時間から粘性減衰係数を計算で求め、Duty 比と粘性減衰係数の関係を明らかにする。測定方法は、コイルの両端に双方向スイッチ回路を接続し、Duty 比を変え、静かに重りを天板に落とした時の変位 x を測定する。測定後、式 (2.11)、(2.12)、(2.13) を用いて粘性減衰係数を求める。重りやばね定数は、抵抗時の測定と同じである。また、PWM 信号は発信機 (RIGOL, DG1032Z) を使用し、1 [kHz] で駆動回路に入力した。図 2-16～図 2-24 に Duty 比を 1 [%], 5 [%], 10 [%], 20 [%], 50 [%], 80 [%], 90 [%], 95 [%], 99 [%] の順に結果を示す。

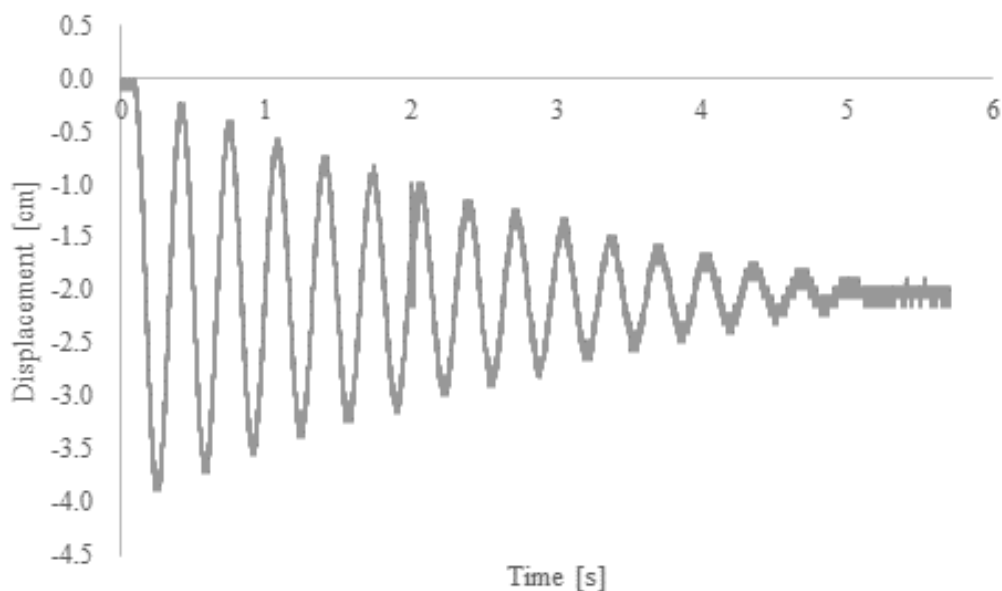


図 2-16 Duty 比 1[%]の変位

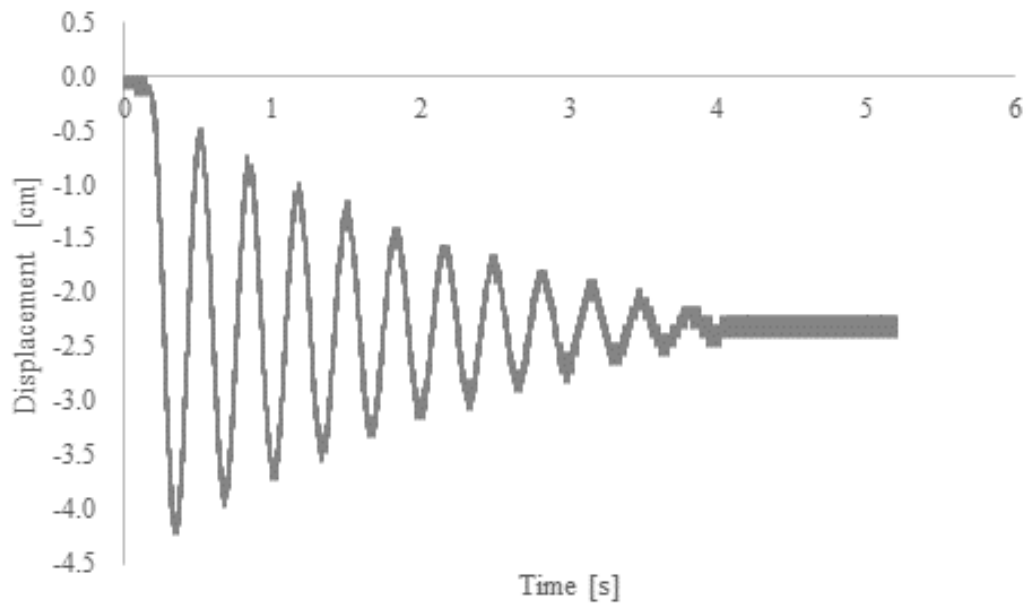


図 2-17 Duty 比 5[%]の変位

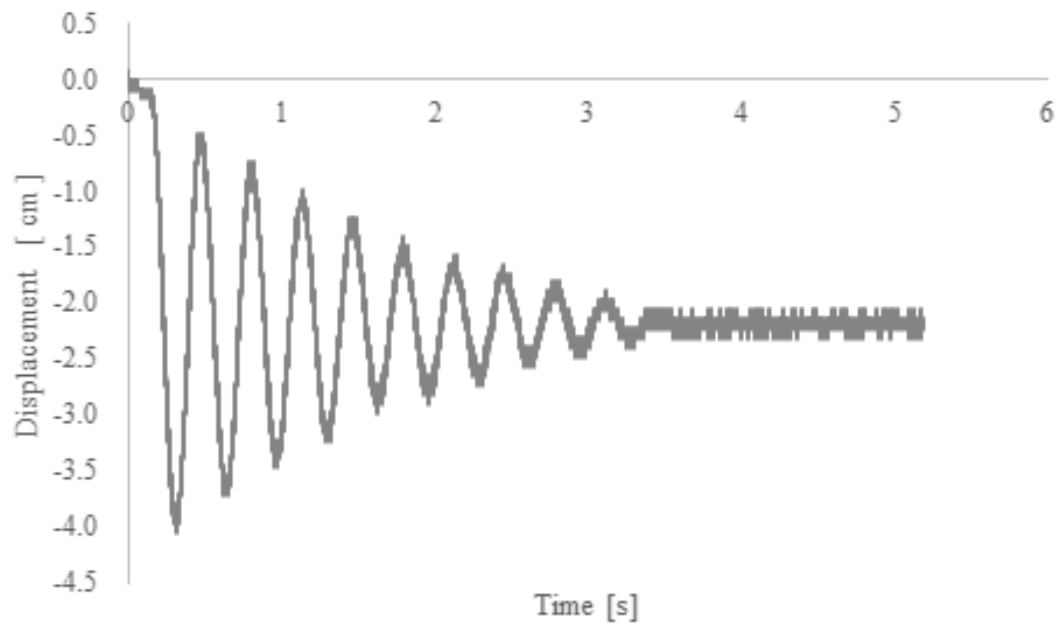


図 2-18 Duty 比 10[%]の変位

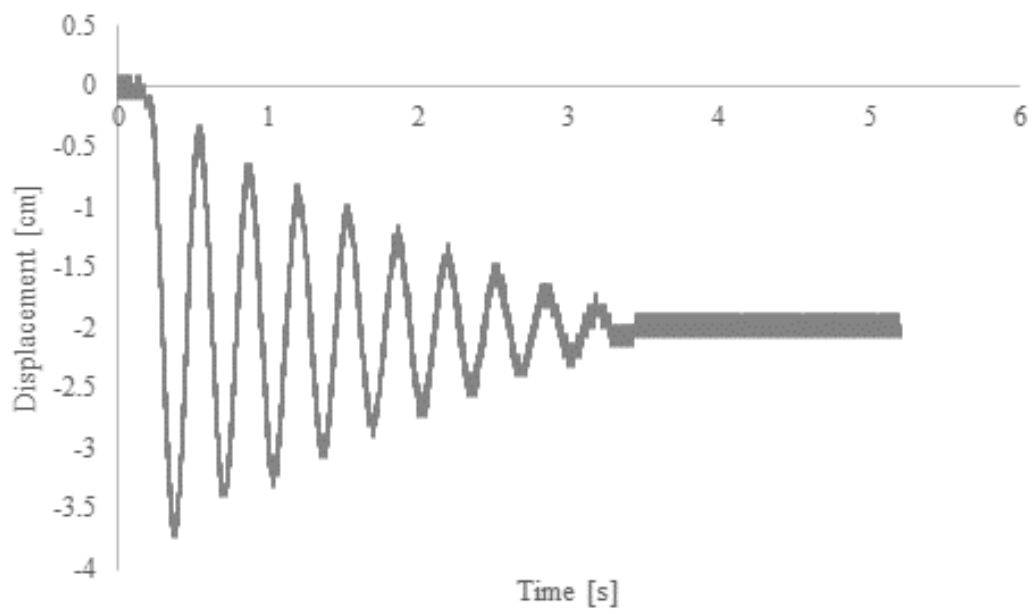


図 2-19 Duty 比 20[%]の変位

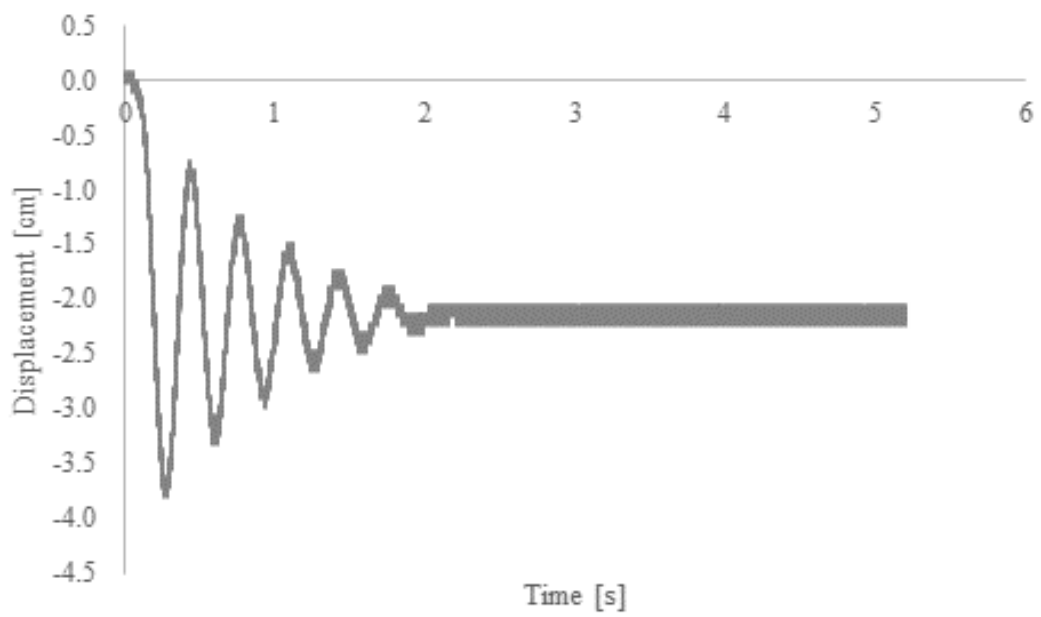


図 2-20 Duty 比 50[%]の変位

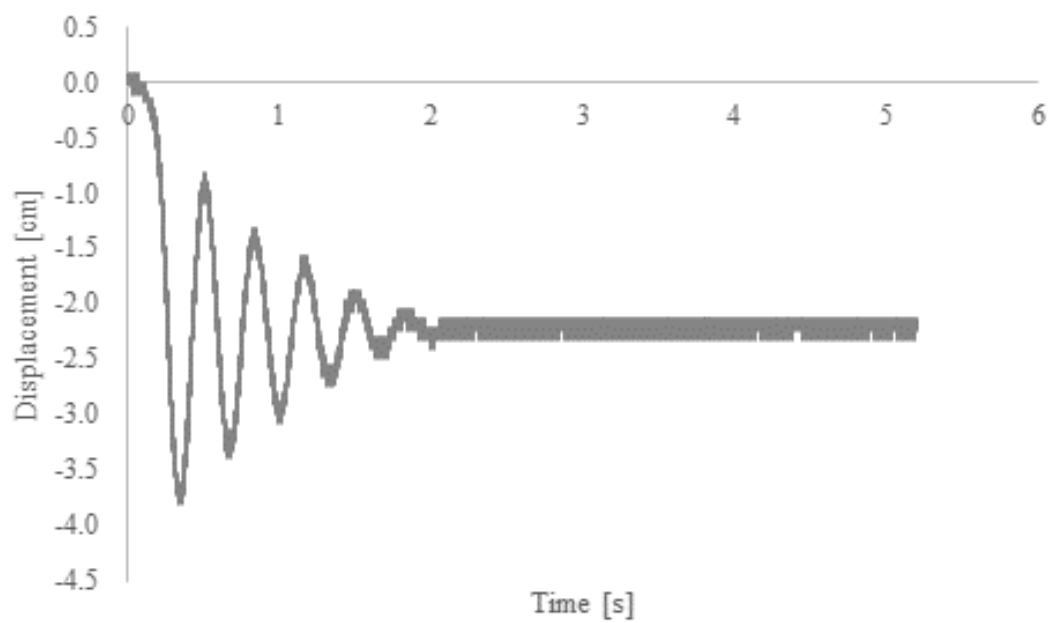


図 2-21 Duty 比 80[%]の変位

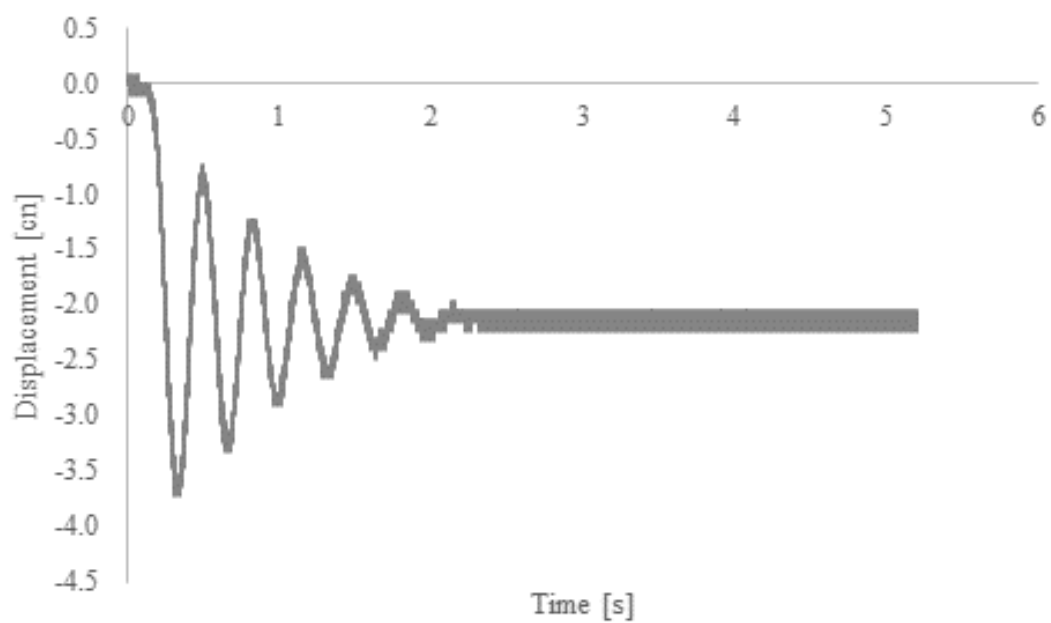


図 2-22 Duty 比 90[%]の変位

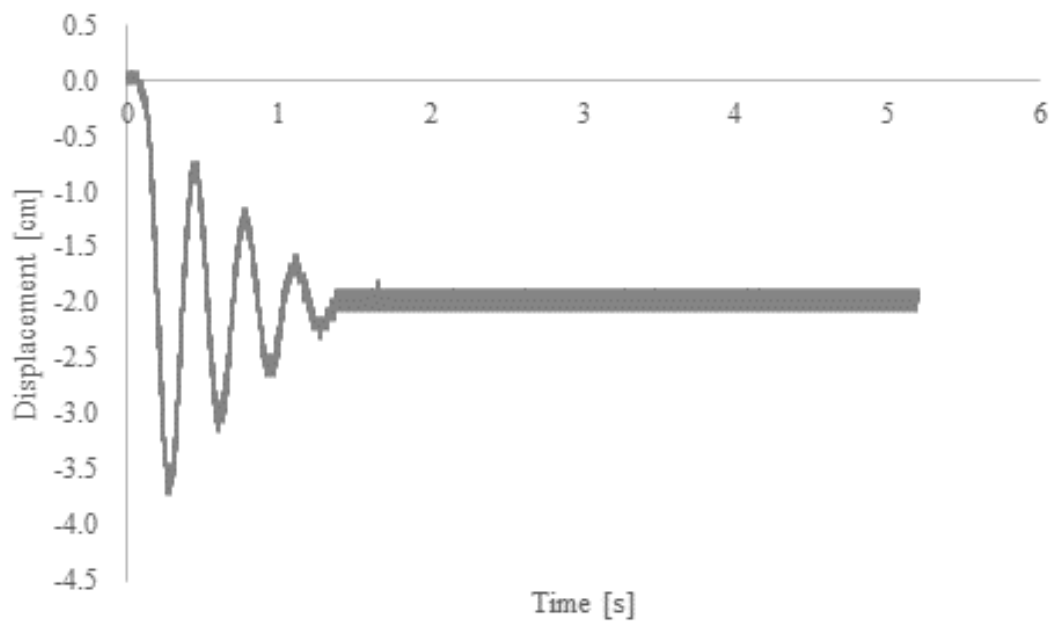


図 2-23 Duty 比 95[%]の変位

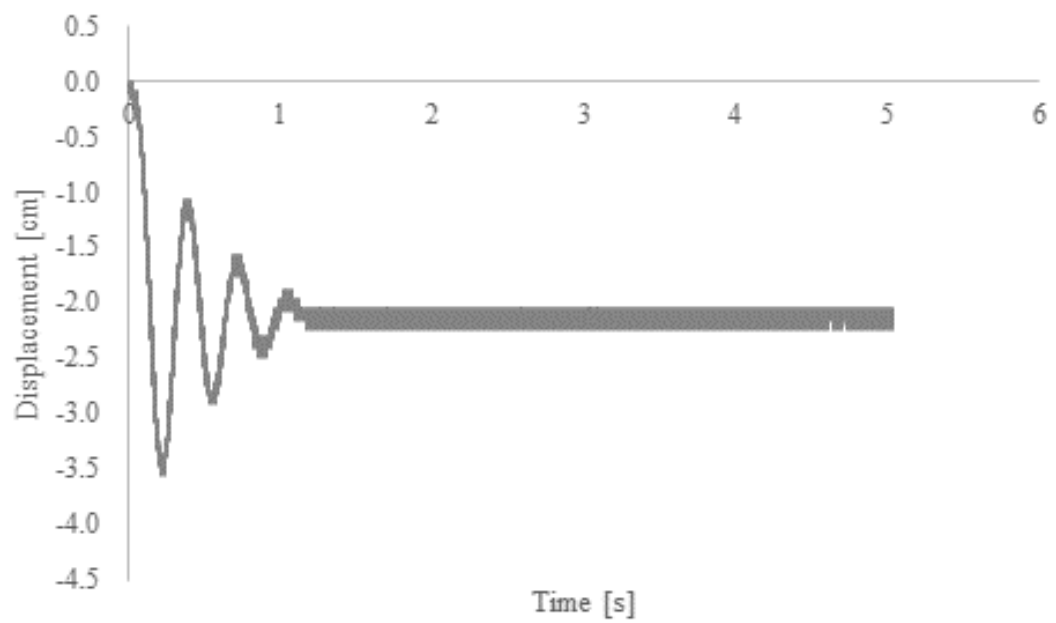


図 2-24 Duty 比 99[%]の変位

Duty 比の値が大きくなると、振動の収束までの時間が短くなっている。この結果より、PWM 信号の Duty 比を変えることで、制震デバイスの粘性減衰係数が変化していることを確認した。

各 Duty 比の粘性減衰係数の結果を図 2-25 に示す。粘性減衰係数の最大値は Duty 比 99 [%] のとき約 120 [N s/m] となり、最小値は Duty 比 1 [%] のとき約 30 [N s/m] となった。したがって、試作した制震デバイスの粘性減衰係数は 30~120 [N s / m] の範囲で変えることができた。

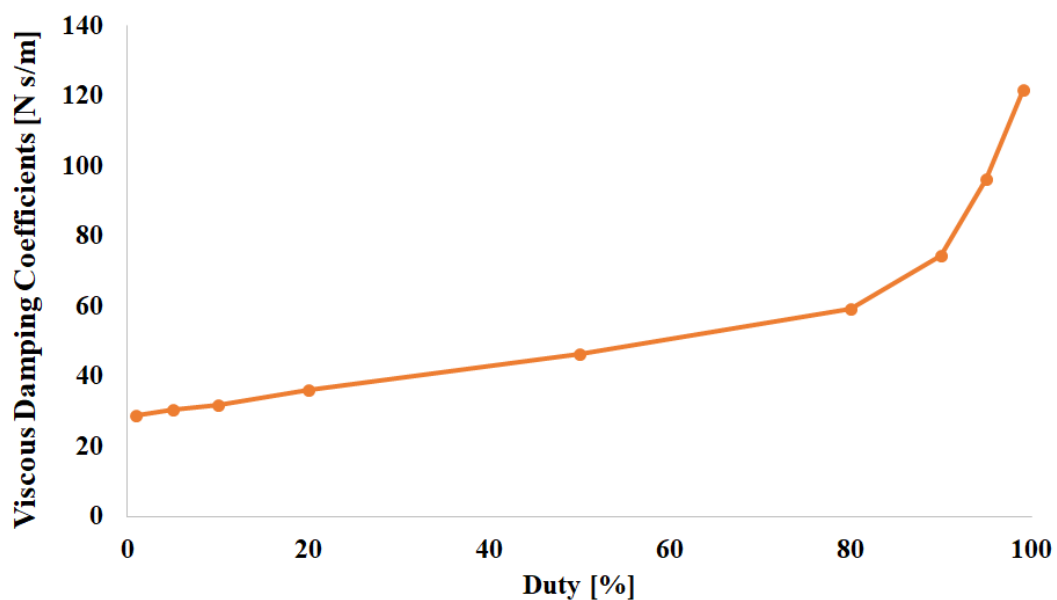


図 2-25 Duty 比と粘性減衰係数の特性

2.3.4 抵抗と Duty 比との粘性減衰係数の比較

図 2-26 に、抵抗と Duty 比でそれぞれ測定した粘性減衰係数の結果を示す。図より、接続抵抗と Duty 比でほぼ同じになることを確認できた。したがって、PWM 信号で双方向スイッチ回路を駆動させると、制震デバイスの粘性減衰係数を変化させることができる。

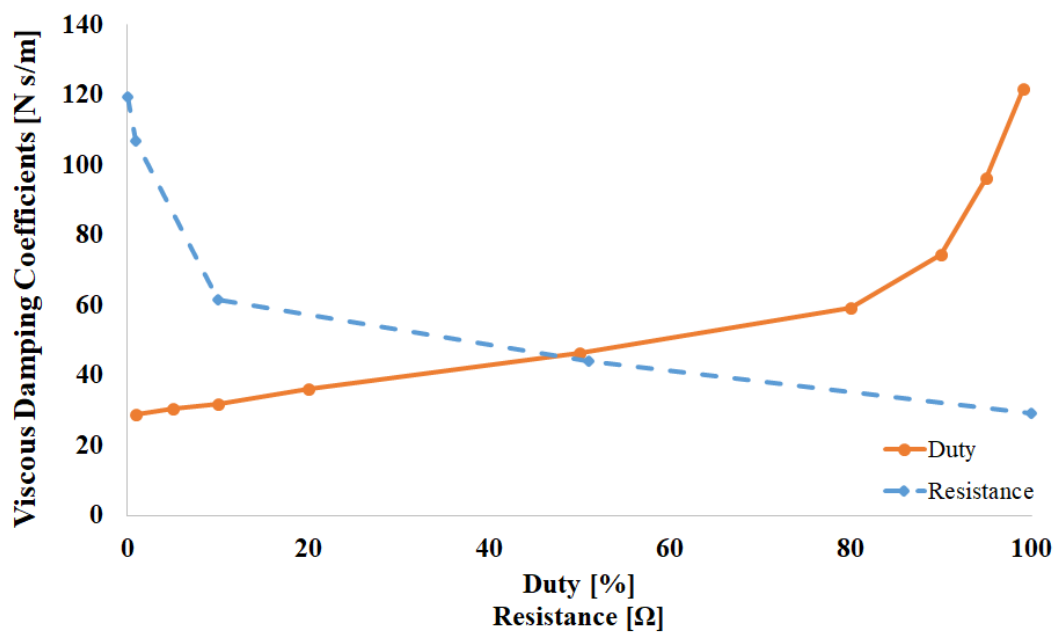


図 2-26 接続抵抗と Duty 比でそれぞれ測定したときの粘性減衰係数の比較

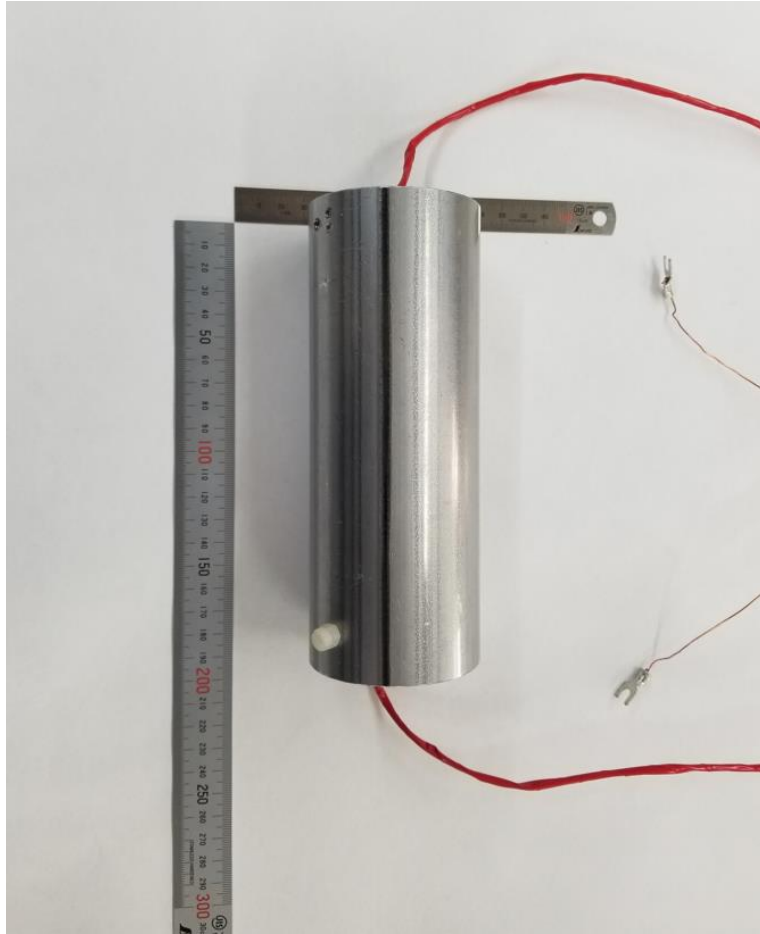
2.4 制震デバイスの開発

ANSYS によるシミュレーションを行い、より大きい誘導起電力を発生できる制震デバイスを作製する。

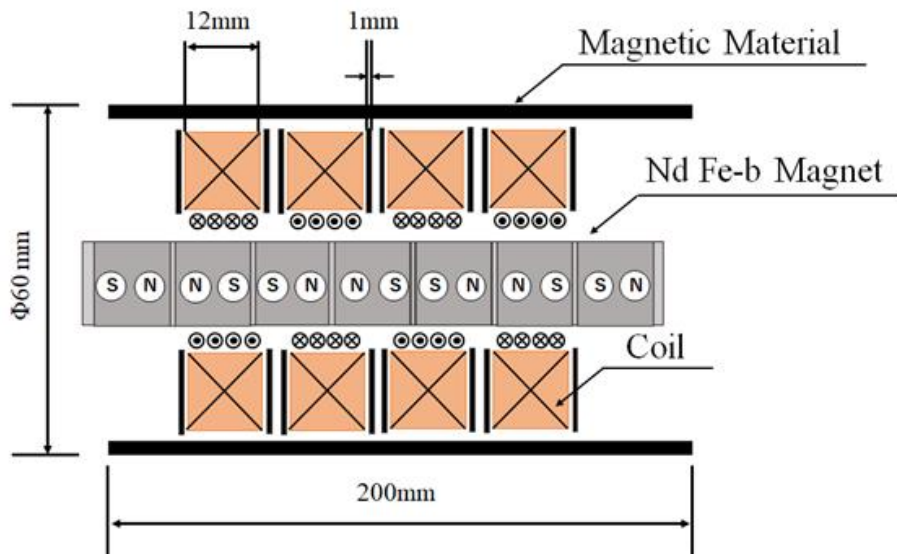
試作した制震デバイスのパラメータを表 2-1、実際の制震デバイスを図 2-27 にそれぞれ示す。

表 2-1 作製した制震デバイスのパラメータ

コイルの導線の太さ	0.5 [mm]
スロットの溝の深さ	32 [mm]
スロット数	4
コイルの巻数	230 [回]
磁石の保磁力	796 [kA/m]
デバイスの重さ	2.3 [kg]
デバイスの全長	200 [mm]
デバイスの直径	60[mm]
全体の重さ（継鉄含め）	4.3 [kg]



(a) 実際の制震デバイス



(b) 制震デバイスの断面図

図 2-27 試作した制震デバイス

表 2-1 で作製した制震デバイスの粘性減衰係数の測定した結果を図 2-28 に示す。図より、Duty 比を調整することで粘性減衰係数を 120[Ns/m]から 230[Ns/m]の範囲で変化していることが分かる。

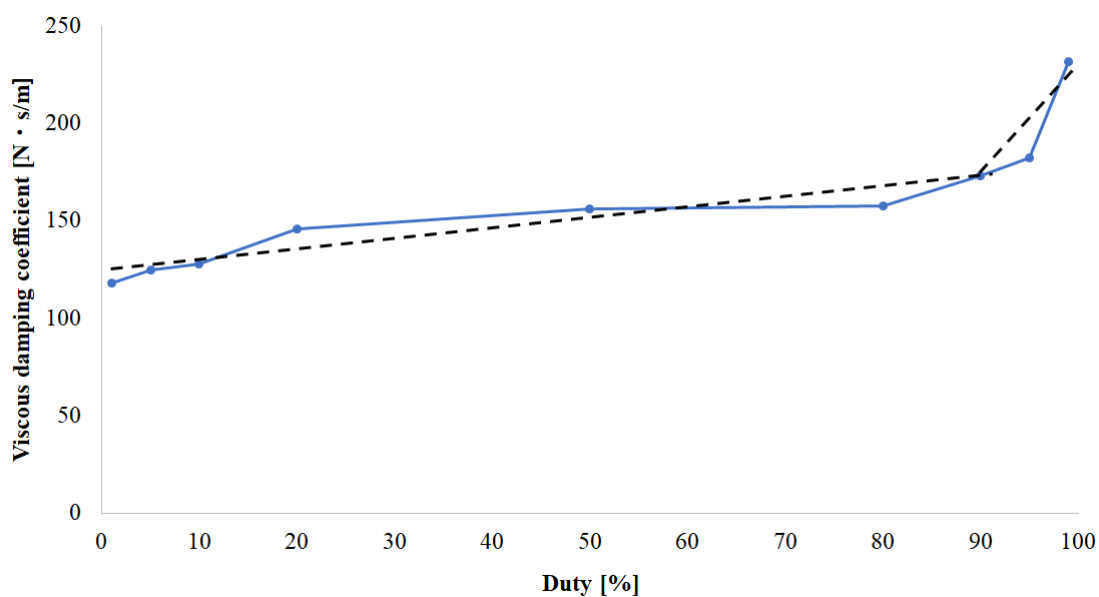


図 2-28 Duty 比と粘性減衰係数の特性

同図の点線は、Duty1%から Duty90%の範囲と Duty90%から Duty99%の範囲でそれぞれ直線近似したものである。近似式は、下記の通りである。

$$y = 0.52w + 124 \quad (1 \leq w < 90) \quad (2-15)$$

$$y = 6.34w - 404 \quad (90 \leq w \leq 99) \quad (2-16)$$

ここで、 w は Duty 比である。この制震デバイスは、起電力の発生に伴って減衰力が発生するものである。ここで作製した制震デバイスを用いて、実機を用いた実験で使用する。

2.5 本章の結論

本章では、制震デバイスの設計及び電子制御可能な粘性減衰係数のシステムについて報告してきた。

制震デバイスは、直線動作型発電装置をアクチュエータとして利用するため、大きな誘導起電力が発生するパラメータを、シミュレーションを用いて設計した。設計した制震デバイスは、磁石とコイルで構成されているので、単純な構造をしている。単純な構造のため、メンテナンスが不要で、安価で小型な制震デバイスを作ることができる。また、制震デバイスの減衰力は、PWM 信号で駆動する双方向スイッチ回路を用いることで変化させることができる。したがって、PWM 信号の Duty 比を変えることで、セミアクティブに粘性減衰係数を電気信号で変えることができる制震デバイスの特性を明らかにした。

参考文献

- (1) K. Takahara K, S. Ohsaki, Y. Itoh, K. Ohyama and H Kawaguchi, “Characteristic Analysis and Trial Manufacture of Permanent-Magnetic Type Linear Generator”, IEEJ Trans. IA, Vol. 127, No. 6, 669 / 674 (2007)
- (2) 砂川重信：理論電磁気学 第3版，紀伊国屋書店，1999
- (3) 小野測器：https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/dampingfactor/dampingfactor_1.htm

3 章 制震システムの制御系設計

本章では、木造住宅の数式モデル化と制御系の設計について述べる。制御対象は、複数世帯が共有する木造住宅とした。この住宅は木造の長屋を想定しており、壁を共有とした構造になっている。一世帯だけ壁を耐震補強すると柱に力が集中することで倒壊する可能性がある。そこで、外部から入力される振動に応じて減衰力を変化することができるセミアクティブ制震システムを考える必要がある。

本章では、スライディングモード制御理論に基づいて制御系の設計することが課題となる。

3.1 木造住宅の数値モデル化

地上構造物の振動現象は、集中定数系モデルに置き換えて考える場合が多い。このモデルでは、地震動が入力されると、構造系の固有周期および減衰定数に応じて、質点には入力動とは異なる加速度、速度、変位が応答値として発生する。特に構造系の減衰定数が小さく、入力動の卓越周期と構造系の固有周期が近い場合には、これら質点の応答値は入力動に対して大きく増幅されたものとなる。

図 3-1 に制御対象とする住宅の見取り図を示す。この住宅は、二つの家屋が壁を共有して構成されているものとする。図中の中央の斜線部分は 2 つの世帯が共有する壁を表している。図 3-2 にその木造住宅のモデルを示す。ここでは、岩波らが提唱している建築物の低次元モデル化^{(1),(2)}の考えに基づき、同図(b)のような 2 自由度の集中定数系モデルを作成した。このモデルでは、家屋の正面と背面の壁の質量とばね定数、粘性減衰係数で集中化させた。地震動は柱の下部を家屋の前後方向に揺らす地震動の変位とした。

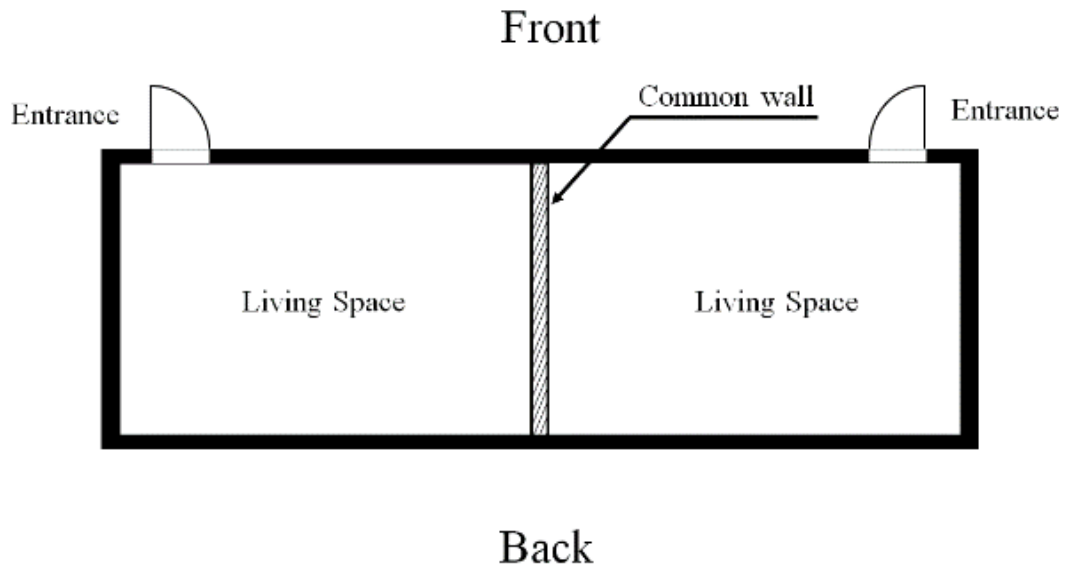


図 3-1 木造の壁を共有とした長屋の見取り図

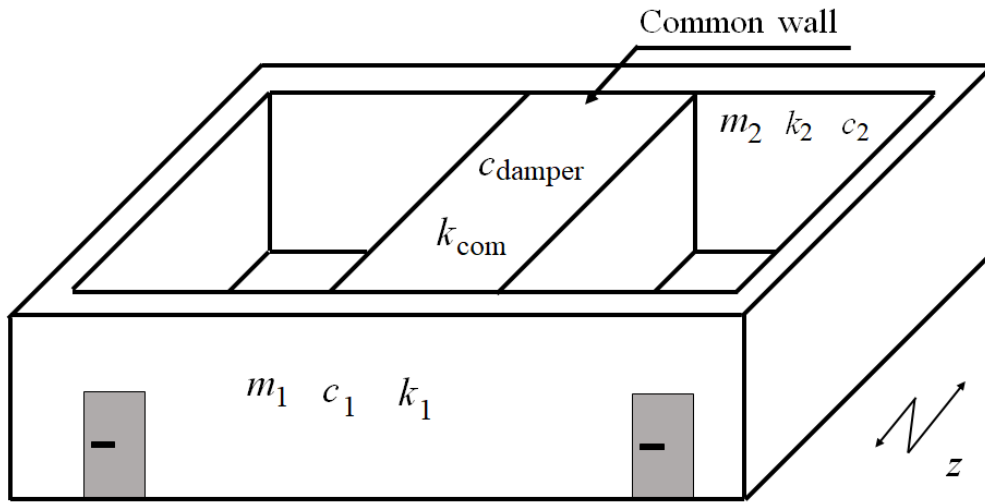
制震デバイスを取り付けた木造建築の平屋の集中定数モデルは以下の式で記述される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{D}z(t) \quad (3.1)$$

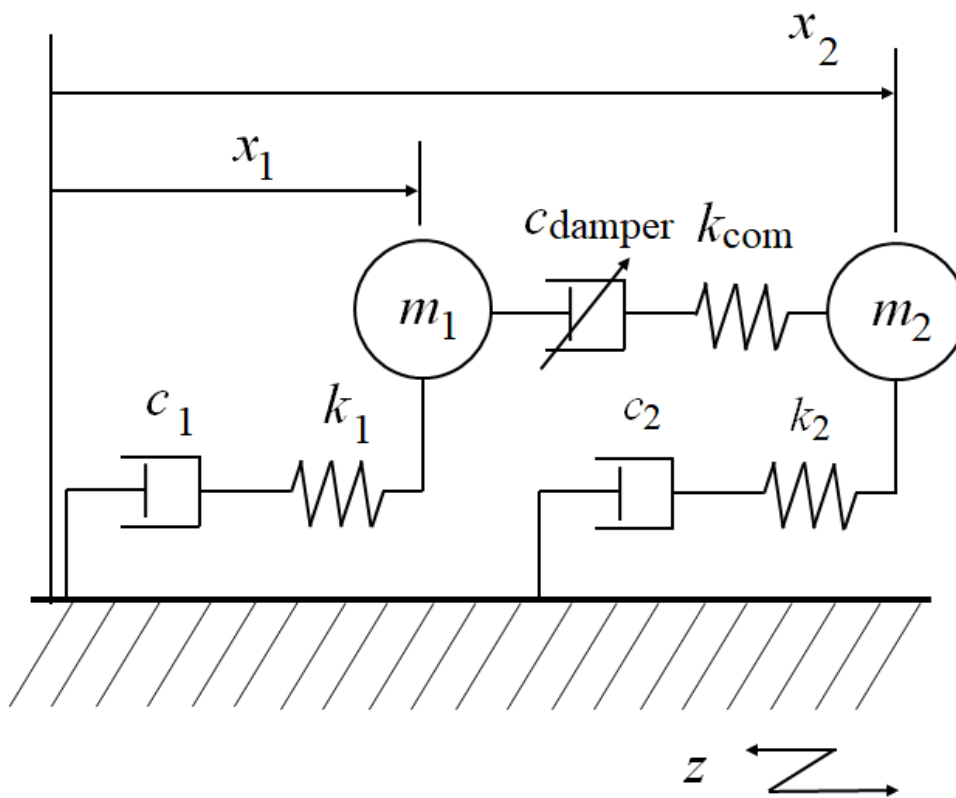
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_{\text{damper}} & -c_{\text{damper}} \\ -c_{\text{damper}} & c_2 + c_{\text{damper}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_{\text{com}} & -k_{\text{com}} \\ -k_{\text{com}} & k_2 + k_{\text{com}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

ここで、 \mathbf{M} は質量マトリクス、 \mathbf{C} は減衰係数マトリクス、 \mathbf{K} は剛性マトリクスであり、右辺は建物が地震動から受ける外力とする。ここでは、外部入力 of $z(t)$ は、A Gonzalez-Buelga ら⁽³⁾のモデルを参考にしており、地震動の変位としている。



(a) 壁を共有とした木造住宅のモデル



(b) 集中定数系のモデル

図 3-2 構造モデル

- m_1 : 長屋正面の壁の質量
 k_1 : 長屋正面の壁のばね定数
 c_1 : 長屋正面の粘性減衰係数
 m_2 : 長屋背面の壁の質量
 k_2 : 長屋背面の壁のばね定数
 c_2 : 長屋背面の粘性減衰係数
 k_{com} : 家屋が共有している壁のばね定数
 c_{damper} : 家屋が共有している壁の粘性減衰係数と
制震デバイスの粘性減衰係数
 z : 地震動
 x_1 : 基準から m_1 までの距離
 x_2 : 基準から m_2 までの距離

建物の壁の状態は居住者によって異なっており、例えば本棚を建物の壁にアンクル等で直接固定した場合には、建造当初とはパラメータが異なり、建造時に制震システムを設計しても十分に対応できない可能性がある。また、地震の最中に壁が崩れた場合などパラメータが変動しても制御性能を発揮できるようにする必要がある。そこで、ここではロバスト性に優れ、建物の免震システムにも用いられている⁽⁴⁾スライディングモード制御理論を利用することにした。

3.2 スライディングモード制御⁽⁵⁾⁽⁶⁾

スライディングモード制御は、線形系と非線形系、パラメータ変動系、時変系など、未知パラメータや未知外乱を有する系に適用できる。希望の特性を切換面として設計すると、システムは等価的に希望の特性に拘束され適応していく。スライディングモード制御は、制御入力の不連続に変化する非線形制御の性格と、スライディングモードが存在すれば希望の特性に敵魚していく適応制御の性格の両面を持っている。

制御系の構造を変える理論は可変構造制御系 (Variable Structure Control system) 理論と呼ばれている。この可変構造制御系理論の中で最も理論的に体系化されている制御系がスライディングモード制御理論である。この制御理論は、システムの安定化やサーボ系をはじめとする、さまざまな制御目的に適応できるまでに理論が進んでいる。また、特徴として、優れたロバスト制御系が構成できる。ここでは、野波らが執筆している「スライディングモード制御-非線形ロバスト制御の設計理論⁽⁷⁾」を基にスライディングモード制御理論について記述する。

3.2.1 線形系に対するスライディングモード制御理論

ここでは、一般的な線形時不変の状態方程式で表されるシステムを扱う。

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.2}$$

ここで、 $x \in R^n$ 、 $u \in R^l$ である。 B のマトリクスの l 個の列ベクトルは $b_i (i = 1, 2, \dots, l)$ とする。

スライディングモードを伴う可変構造系の基本的な用語を定義する。

定義 1

可変構造制御系の構造は、ベクトル関数 $\sigma(x)$ の符号によって支配される。この $\sigma(x)$ は切換関数 (Switching Function) と呼ばれる。切換関数は、一般に l 次元であり、かつ線形である。よって、

$$\sigma(x) = Sx \tag{3.3}$$

ここで

$$\sigma(x) = [\sigma_1(x), \sigma_2(x), \dots, \sigma_l(x)]^T \tag{3.4}$$

ただし、 T は転置を示す。そして、

$$S = [S_1^T, S_2^T, \dots, S_l^T]^T \tag{3.5}$$

このようにして,

$$\sigma_i(x) = S_i^T x \quad (3.6)$$

各々のスカラの切換関数 $\sigma_i(x)$ は線形な面 $\sigma_i(x) = 0$ を含んでいるが, これは切換面 (Switching Surface) と定義されている。このように i 個の切換面を有する場合には, 切換多様面 (Switching Manifold) という用語がしばしば用いられる。さらにこのとき, 切換関数が線形なので, 切換多様体の面を切換超平面 (Switching Hyperplane) と呼ぶ。

初期時間 t_0 で, システムの初期状態を x_0 とする。 $x(t)$ は任意の時間 t でのシステムの状態とし, σ を原点 $x = 0$ を含む切換面とする。

定義 2

もし, σ 上に任意の初期値 x_0 があるならば, すべての $t > t_0$ に対して, $x(t)$ は σ 上に常に存在する。このとき, $x(t)$ は滑り運動あるいはスライディングモーション (Sliding Motion) または滑り状態あるいはスライディングモード (Sliding Mode) と呼ぶ。

定義 3

もし, σ 上のすべての点が終点であるならば, すなわち σ 上のすべての点に対して σ の両側からトラジェクトリまたは軌道が σ に向かう状態のとき, 切換面 σ は滑り面 (Sliding Surface) と呼ばれる。

定義 4

状態が滑り面の方向に向かうときや滑り面にたどり着く条件は到達条件 (Reaching Condition) と呼ばれる。

以上の定義 1~4 から, l 個の入力を持つ n 次系のシステムは, $2^l - 1$ 個の切換面を持つことになる。

3.2.2 切換方式

ここでは、切換方式について記述する。切換方式の数は、異なったスライディングモードの時数に依存して存在する。

○固定次数切換方式（固定階層制御法）

この方式では、スライディングモードはシステムの状態が状態空間を移動するとき、あらかじめ割り与えられた次数で発生する。例えば、状態が初期状態 x_0 から $n - 1$ 次の切換面 σ_1 に動くとする。このとき、スライディングモードは $n - 2$ 次元の切換面 $\sigma_{12} = (\sigma_1 \cap \sigma_2)$ に動くことができる。スライディングモードはより低い次元の滑り面に漸近的に動き、最終的に $n - l$ 次元の滑り面 σ_e に到達する。すなわち

$$x_0 \rightarrow \sigma_1 \rightarrow (\sigma_1 \cap \sigma_2) \rightarrow (\sigma_1 \cap \sigma_2 \cap \sigma_3) \rightarrow \dots \rightarrow \sigma_e$$

これは、階層形スライディングモード制御方式と呼ばれている。この方式はいくつかの弱点を持っている。それは、一般に過渡応答特性が悪く、結果的に大きな振幅となる。

○自由次数切換方式（自由階層制御法）

この方式は、スライディングモードの次数はあらかじめ割り当ててなく、最初の切換面への到達と切換方式は、自然な状態空間の軌跡に任せるというものである。したがって、切換は状態空間の中の初期状態の位置に依存して起こることになる。この方式は、固定次数切換方式に比べて、次の3つの理由からより自然であり合理的といえる。1つめは、自由次数切換を用いればスライディングモード制御の解は簡単に決められる。2つめは、自然に切換面に到達したモードはより良いダイナミクスを持つ。3つめは、結果的に制御性能は良くなり、飽和もほとんどなくなる。

○最終スライディングモード切換方式（最終階層制御法）

この方式では、状態は任意の初期状態からスライディングモード制御が起こる最終滑り面まで導かれる。他の切換面上でスライディングモードが発生するか分からないが、この方式は簡単に実装化でき、制御も円滑に実行できる。

3.2.3 到達条件と到達モード

状態が滑り面のほうに向かって動き、かつ、滑り面に到達する条件を到達条件 (Reaching Condition) と呼ぶ。到達条件の下でのシステムの軌跡は到達モード (Reaching Mode) または到達位相と呼ばれる。到達条件を指定するために、3つのアプローチが提案されている。

A) 直接切換関数法

最も初期に提案された到達条件は、

$$\left. \begin{array}{ll} \dot{\sigma}_i > 0 & \sigma_i < 0 \text{ のとき} \\ \dot{\sigma}_i < 0 & \sigma_i > 0 \text{ のとき} \end{array} \right\} (i = 1, 2, \dots, l) \quad (3.7)$$

あるいは、等価的に

$$\sigma_i \dot{\sigma}_i < 0 \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (3.8)$$

この到達条件は包括的であるが、有限な到達時間は保証していない。上式は、他入力スライディングモードに対しては適用することが困難である。

B) リアプノフ関数法

リアプノフ関数の候補

$$V(x, t) = \sigma^T \sigma \quad (3.9)$$

を選ぶことによって、包括的な到達条件が与えられる。

$$\dot{V}(x, t) < 0 \quad \sigma \neq 0 \text{ のとき} \quad (3.10)$$

有限な到達時間は、式 (3.10) を次のように修正することで保証される。

$$\dot{V}(x, t) < -e \quad \sigma \neq 0 \text{ のとき} \quad (3.11)$$

このアプローチは、最終スライディング切換方式へと導くことになる。 e は正の数とする。

C) 到達則法

到達則法は、切換関数のダイナミクスを直接指定する方法である。切換関数のダイナミクスが、次の微分方程式によって指定される。

$$\dot{\sigma} = -Q \operatorname{sgn}(\sigma) - Kf(\sigma) \quad (3.12)$$

ここで、ゲイン Q , K は対角行列で正の要素からなり、 sgn は符号関数を示す。

$$\text{sgn}(\sigma) = [\text{sgn}(\sigma_1), \dots, \text{sgn}(\sigma_l)]^T$$

$$f(\sigma) = [f_1(\sigma_1), \dots, f_l(\sigma_l)]^T$$

スカラー関数 f_i は次の条件を満足する。

$$\sigma_i f_i(\sigma_i) > 0 \quad (\sigma_i \neq 0, \quad i = 1, 2, \dots, l)$$

式 (3.12) は到達則と呼ばれる。 Q, K を任意に指定することによって、到達則 σ の構造、状態を指定することができる。

到達則のアプローチは、到達条件を確立するのみならず、到達位相中のシステムの動特性も指定する。

3.2.4 制御則

スライディングモード制御則の設計は、2つの要素によって影響を受ける。1つめは、スライディングモードに入る方式の選択である。2つめは、制御則の構造をあらかじめ指定するかの問題である。

はじめに、スライディングモードに入る方式から考察する。式 (3.2) ~ (3.5) のモデルで考える。

A) 切換方式の影響

i) 固定次数切換方式

この方式に対しては、制御力 u の決定は l 個の対の不等式の解を含む。

$$\dot{\sigma}_i = \frac{\partial \sigma_i}{\partial x} (Ax + Bu) = \begin{cases} > 0 & \sigma_i < 0 \text{ のとき} \\ < 0 & \sigma_i > 0 \text{ のとき} \end{cases} \quad (3.13)$$

b_i は B マトリクスの i 番目の列ベクトルとする。この結果、次式の関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} S_1^T Ax + S_1^T b_1 u_1 + \dots + S_1^T b_l u_l &= \begin{cases} < 0 & \sigma_1 > 0 \text{ のとき} \\ > 0 & \sigma_1 < 0 \text{ のとき} \end{cases} \\ \vdots \\ S_l^T Ax + S_l^T b_1 u_1 + \dots + S_l^T b_l u_l &= \begin{cases} < 0 & \sigma_l > 0 \text{ のとき} \\ > 0 & \sigma_l < 0 \text{ のとき} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

式 (3.14) は、 $2l$ 個の未知の制御入力に対して、 $2l$ 個の条件不等式から成り立っている。 $2l$ 個の制御入力とは $u_i(x)$ ($i = 1, \dots, l$) で、各々の $u_i(x)$ に対して2つの異なった条件があり入力が2つ存在することになる。

これらに対して、式 (3.13) を解くことは大変困難である。したがって、固定次数の切換は概念としては分かりやすいが、実現は難しいといえる。

ii) 自由次数切換方式

この方式に対しては、式 (3.12) で記述された到達則指定の条件から直接的に解かれる。

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} (Ax + Bu) = -Q \operatorname{sgn}(\sigma) - Kf(\sigma) \quad (3.15)$$

これから、スライディングモード制御は簡単に次式として得られる。

$$u(x) = - \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} B \right)^{-1} \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial x} Ax + Q \operatorname{sgn}(\sigma) - Kf(\sigma) \right\} \quad (3.16)$$

iii) 最終スライディングモード切換方式

この方式に対しては，制御系は次のリアプノフの安定条件を満足するように設計される。

$$\dot{V} = \frac{d}{dt}(\sigma^T \sigma) = \sigma^T \dot{\sigma} = \sigma^T \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x} (Ax + Bu) < 0 \quad (3.17)$$

この場合のスライディングモード制御に対する解は，自由次数の切換方式に対する解を含んでいる。

B) スライディングモード制御の構造の性質

スライディングモード制御の設計は，制御入力 $u(x)$ が最初に自由またはあらかじめ割り当てられているという方式である。どちらの場合も，目的は到達条件を満足することである。自由な構造の場合は，一般に制御入力 $u(x)$ は，次の条件のどれかの切換関数によって決められる。

①直接切換方式

$$\sigma_i \dot{\sigma}_i < 0 \quad (3.18)$$

②リアプノフ関数法

$$\dot{v} = \frac{d}{dt}(\sigma^T \sigma) < 0 \quad (3.19)$$

③到達則法

$$\dot{\sigma}_i = -q_i \text{sgn}(\sigma_i) - k_i f_i(\sigma_i) \quad (3.20)$$

いくつかの場合においては，スライディングモード制御の構造をあらかじめ割り当てることは便利である。この場合，希望の到達則が満足されるようにコントローラゲインを決めることが重要である。次に，3つのよく知られた制御則を指定する構造の形式を示す。

i) リレー制御

制御ベクトル u の各要素に対して，スライディングモード制御はリレーの形式の入力をとる。リレーゲインは変わらないか，または状態に依存して変わるかのどちらかである。

$$u_i(x) = \begin{cases} k_i^+(x, t) & \sigma_i > 0 \text{ のとき} \\ k_i^-(x, t) & \sigma_i < 0 \text{ のとき} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (3.21)$$

k_i^+ , k_i^- の値は、望ましい到達条件を満足するように選ばれる。

ii) 切換ゲインを有する線形フィードバック

あらかじめ割り当てられた構造は、

$$u(x) = \Psi(x)x \quad (3.22)$$

である。ここで、 $\Psi = \{\Psi_{ij}(x)\}$ は状態に依存して変化する $l \times n$ のマトリクスである。ゲインに対してよく知られている構造は、

$$\Psi_{ij}(x) = \begin{cases} \alpha_{ij} & \sigma_i(x)x_j > 0 \text{ のとき} \quad (i = 1, 2, \dots, l) \\ \beta_{ij} & \sigma_i(x)x_j < 0 \text{ のとき} \quad (j = 1, 2, \dots, l) \end{cases} \quad (3.23)$$

パラメータ α_{ij} と β_{ij} は、希望の到達条件を満たすように選ぶ。式 (3.23) は、問題に適したように変えることができる。

iii) 拡大系の等価制御

個々のスライディングモード制御は、

$$u = u_{eq} + \Delta u \quad (3.24)$$

の形をとる。ここで、 u_{eq} は等価スライディングモード制御入力で、 Δu は到達条件を満足するために付加された項である。

3.2.5 スライディングモードの存在条件

スライディングモードの存在条件は、以下の2つの条件がよく知られている。

[存在条件 1]

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_i < 0 & \quad \sigma_i > 0 \text{ のとき} \\ \dot{\sigma}_i > 0 & \quad \sigma_i < 0 \text{ のとき} \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (3.25)$$

であれば、切換超平面 $\sigma_i = 0$ の近傍でスライディングモード領域が存在する。これは、任意の初期値から有限時間内に切換超平面およびその交点でスライディングモードを生じる。しかし、この条件は有限時間内に切換超平面に到達することを保証しない。

[存在条件 2]

次のリアプノフ関数を選ぶ。

$$V = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma \quad (3.26)$$

ここで

$$\sigma(x) = [\sigma_1(x), \sigma_2(x), \dots, \sigma_l(x)]^T$$

である。この関数について次の式を満足すれば

$$\dot{V}(\sigma) < 0 \quad (3.27)$$

切換超平面 $\sigma_i = 0$ の近傍でスライディングモードが生じる。多入力系の場合では、各切換面 $\sigma_i = 0$ に達しただけではスライディングモードが生じず、

$$\sigma(x) = [\sigma_1(x), \sigma_2(x), \dots, \sigma_l(x)]^T = 0 \quad (3.28)$$

すなわち、各切換面の交線に収束して、そこで初めてスライディングモードが生じる。もっと強い十分条件として、次式

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} < -\eta |\sigma| < 0 \quad \eta > 0 \quad (3.29)$$

を満足すれば、全領域で切換超平面に到達することができる。

3.2.6 等価制御法による解析

スライディングモードが存在しているとき、システムは非線形性の最も強いスイッチング入力のため、解析などが著しく困難となる。このスイッチング入力を連続入力で置き換えることにより、解析及び設計の見通しがよくなる。これは、等価制御と呼ばれ、もとのシステムに代入することによって、スライディングモードにあるときのシステムの動特性を解析できる。

システムを

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \sigma &= Sx \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

と定義し、 B 、 S をフルランクとする。式(3.30)において、スライディングモードが存在すると、

$$\dot{\sigma} = 0 \quad (3.31)$$

から、 $\det(SB) \neq 0$ ならば等価制御入力が

$$u_{eq} = -(SB)^{-1}SAx \quad (3.32)$$

と求まる。

図3-3に示すように、この等価制御入力 u_{eq} はシステムの理想的な連続制御入力である。 u_{eq} をもとのシステムの式(3.30)に代入することによって、入力の数だけ低次元化されたシステム

$$\dot{x} = \{I - B(SB)^{-1}S\}Ax \quad (3.33)$$

が得られる。これは、スライディングモードによって時間軸上で応答の速い部分と遅い部分とに分離された結果である。すなわち、切換面に拘束させるために、大きな入力で切換面に漸近させて $\sigma = 0$ を得る。

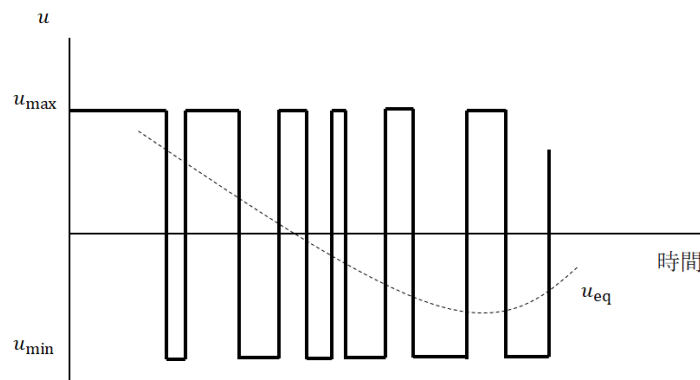


図 3-3 等価制御入力

3.2.7 切換超平面の設計

ここでは、固有ベクトル配置法による超平面について記述する。

次の l 入力 n 次システムを考える。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \sigma &= Sx \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

システムの等価制御によって、

$$\dot{\sigma} = SAx + SBu = 0 \quad (3.35)$$

から、 $\det(SB) \neq 0$ ならば、等価制御入力が

$$u_{eq} = -(SB)^{-1}SAx \quad (3.36)$$

と求められる。また、式 (3.34) のシステムに代入することによって、入力の数だけ低次元化されたシステムの微分方程式

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A - BK)x \\ K &= (SB)^{-1}SA \end{aligned} \quad (3.37)$$

が得られる。

スライディングモードが生じるとき、次の関係が成立する。

$$S(A - BK) = 0 \Leftrightarrow \text{Ker}(A - BK) \subseteq N(S) \quad (3.38)$$

ただし、 $N(\cdot)$ は行列の零空間を示し、 $\text{Ker}(\cdot)$ は行列の核空間を示す。

λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) は行列 $(A - BK)$ の固有値とすると、

$$\text{diag}(A - BK) = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] \quad (3.39)$$

中の λ_i に対する固有ベクトルは w_i あるから、次の式を得られる。

$$S(A - BK)w_i = \lambda_i Sw_i = 0 \quad (3.40)$$

そして、 $\lambda_i = 0$ または $w_i \in N(S)$ である。スライディングモードを生じる時のシステムは $n - l$ 次に低次元化された系であるから、 $n - l$ 個の固有ベクトルをもつ。したがって、 $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$ 中には必ず l 個の零固有値がある。システムの非零固有値を $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-l}]$ とすると、これに対応する固有ベクトルは $[w_1, w_2, \dots, w_{n-l}]$ である。そして、式 (3.40) は次のように書き直すことができる。

$$(A - BK)W = WJ \quad (3.41)$$

ただし、

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_{n-l}], \quad J = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-l}]$$

である。式 (3.41) は次のように表現できる。

$$\text{col}(AW - WJ) \subset \text{Range}(B) \quad (3.42)$$

ここで、 $\text{col}(\cdot)$ は行列の列ベクトル要素を示す。また、 $B(n \times l) = (b_1 \cdots b_l)$ の列ベクトル $b_1 \cdots b_l$ の線形結合全体を B の値域 (range) といい、 $\text{Range}(B)$ と書く。よって

$$SW = 0 \quad (3.43)$$

行列 SB は正則行列であるから、上式は次式と等価になる。

$$R(W) \cap R(B) = \{0\} \quad (3.44)$$

そして、行列 $[W : B]$ は可逆行列である。その逆を $\begin{bmatrix} W^g \\ B^g \end{bmatrix}$ と定義する。ここで、 B^g 、 W^g はそれぞれ行列 B 、 W の疑似逆行列である。したがって、次の表現

$$B^g B = I_l, \quad W^g B = 0, \quad B^g W = 0 \quad (3.45)$$

が得られる。 $S = B^g$ とすると、 $SB = I_l$ となり、式 (3.41)、式 (3.43) を満足する。これより、行列 $L \in R^{l \times (n-l)}$ が存在すると、式 (3.42) は次の式

$$AW - WJ = BL \quad (3.46)$$

と等価になる。よって、

$$SAW = L \quad (3.47)$$

を得る。

3.2.8 スライディングモードコントローラ的设计

コントローラ的设计は、スライディングモード制御系设计の第二段階である。制御則的设计の目的は、切换面にない状態を切换面で収束させ、その面上に保つことである。この保証に関する部分があるコントローラ的设计に関わっている。ここでは、一般の l 個の入力を有する線形な系

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \sigma &= Sx = 0 \end{aligned} \quad (3.48)$$

に対して、スライディングモードを生じさせることを考える。制御入力は次のように切り換えるものとする。

$$u = \begin{cases} u^+ & \sigma > 0 \text{ のとき} \\ u^- & \sigma < 0 \text{ のとき} \end{cases} \quad (3.49)$$

ここでは、自由階層制御法による设计で制御入力 u について記述する。

階層制御法は、固定階層制御法と自由階層制御法の二種類ある。固定階層制御法は、スライディングモードの発生順番（優先順位）を固定した方法である。この方法は、発生順番を固定しているため、最短時間で各超平面に到達する補償がなく、有限な到達時間が保証されない問題がある。それを改善された方法が、自由階層制御法である。自由階層制御法は、设计したシステムが超平面 σ に入るとスライディングモードを次々と発生させて収束させる方法である。固定階層制御法と比べて、システム状態の超平面に到達する時間が短く、時間経歴に優れたロバスト性を持つ。また、制御入力も小さいので、エネルギーも少なくなる。加えて、チャタリング現象の帽子も行うことができる。

自由階層制御法について制御入力を求める。式 (3.48) と同じシステムで考える。超平面 σ_i でのスライディングモードの存在条件は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\sigma}_i > 0 & \quad \dot{\sigma}_i < 0 \text{ のとき} \\ \dot{\sigma}_i < 0 & \quad \dot{\sigma}_i > 0 \text{ のとき} \end{aligned} \right\} (i = 1, 2, \dots, l) \quad (3.49)$$

この条件を満足するように、自由階層制御法で次の到達則を考える。

$$\dot{\sigma} = -Q \operatorname{sgn}(\sigma) - Kf(\sigma) \quad (3.50)$$

ここで、

$$\begin{aligned}
Q &= \text{diag}[q_1, q_2, \dots, q_l] & q_i &> 0 \\
K &= \text{diag}[k_1, k_2, \dots, k_l] & k_i &> 0 \\
\text{sgn}(\sigma) &= [\text{sgn}(\sigma_1), \text{sgn}(\sigma_2), \dots, \text{sgn}(\sigma_l)]^T \\
f(\sigma) &= [f_1(\sigma_1), f_2(\sigma_2), \dots, f_l(\sigma_l)]^T \\
\sigma_i f_i(\sigma_i) &> 0, \quad \sigma_i \neq 0 \text{ のとき} \quad (i = 1, 2, \dots, l)
\end{aligned}$$

式 (3.48) の σ を微分すると

$$\begin{aligned}
\dot{\sigma} &= S\dot{x} \\
&= S(Ax + Bu) \\
&= SAx + SBu
\end{aligned} \tag{3.51}$$

が得られる。式 (3.50) を代入すると、制御入力は、

$$\begin{aligned}
SAx + SBu &= -Q\text{sgn}(\sigma) - Kf(\sigma) \\
u &= -(SB)^{-1}\{SAx + Q\text{sgn}(\sigma) + Kf(\sigma)\}
\end{aligned} \tag{3.52}$$

となる。このとき、超平面 σ_i にスライディングモードが存在するのみではなく、その超平面の交線にもスライディングモードが存在する。

式 (3.50) に関するリアプノフ関数の候補を次のように選ぶ。

$$V = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma \tag{3.53}$$

この関数の微分を考えると

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= \frac{1}{2} \dot{\sigma}^T \sigma + \frac{1}{2} \sigma^T \dot{\sigma} \\
&= \sigma^T \dot{\sigma} \\
&= \sigma^T \{-Q\text{sgn}(\sigma) - Kf(\sigma)\} \\
&= -\sum_{i=1}^l [\sigma_i q_i \text{sgn}(\sigma_i) + \sigma_i k_i f_i(\sigma_i)] \\
&= -\sum_{i=1}^l [q_i |\sigma_i| + \sigma_i k_i f_i(\sigma_i)] < 0
\end{aligned} \tag{3.54}$$

を得る。これから、 \dot{V} は負になることが分かる。

次に、式 (3.50) の到達則について、以下の三種類の到達則を定義する。

i) 定常到達則

到達則を

$$\dot{\sigma} = -Q\text{sgn}(\sigma) \quad (3.55)$$

と表す。このとき、状態が定常倍率 $|\dot{\sigma}_i| = -q_i$ でスライディングモード超平面へ収束する。この到達則は簡単であるが、 q_i の値が小さくなると到達時間が長くなる。また、 q_i が大きくなればチャタリング現象が起きる。

ii) 比例到達則

到達則を

$$\dot{\sigma} = -Q\text{sgn}(\sigma) - K\sigma \quad (3.56)$$

と表す。上式から分かるように比例項 $-K\sigma$ が入るために、状態変数 x は任意初期値 x_0 からスライディングモード超平面 σ_i に到達する時間は定常到達則の場合より短くなる。この到達時間は次の式

$$T_i = \frac{1}{k_i} \ln \frac{k_i |\sigma_i| + q_i}{q_i} \quad (3.57)$$

により決まる。式 (3.57) より、状態は指数関数の形で超平面へ収束する。

iii) 加速率到達則

到達則を

$$\dot{\sigma}_i = -k_i |\sigma_i|^\alpha \text{sgn}(\sigma_i) \quad 0 < \alpha < 1 \quad (i = 1, 2, \dots, l) \quad (3.58)$$

と表す。この到達則の特性は、状態からスライディングモード超平面までの距離が遠いとき、状態変数の収束速度が速くなる一方、スライディングモード超平面近傍では収束速度が減少する。結果としては、高速収束と低チャタリングの到達則になる。 $\sigma_i = \sigma_{i0}$ から $\sigma_i = 0$ まで式 (3.58) を積分すると、到達時間 T_i は

$$T_i = \frac{1}{(1-\alpha)k_i} \sigma_{i0}^{(1-\alpha)} \quad (3.59)$$

になる。また、式 (3.58) の右辺で、 $-Q\text{sgn}(\sigma)$ の項がないので、チャタリングを減少することができる。しかし、 $\alpha > 1$ のとき

$$T_i \rightarrow \infty \quad \sigma = 0 \quad (3.60)$$

になるので、スライディングモードへの有限到達時間も満たさない。したがって、式(3.58)の α は $0 < \alpha < 1$ の範囲で決定しなければならない。

3.3 スライディングモード制御の設計

3.2節で記述した方法に基づき、スライディングモード制御の設計を行う。スライディングモード制御の設計の手順には、切換超平面の設計をしたのち、スライディングモードコントローラ（制御則）の設計の順に行う。

3.3.1 状態空間モデル

はじめに、制御系設計のため、式 (3.1) を次のように置き換える。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{E}z(t) \quad (3.61)$$

ここで、

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dot{x}_1(t) \ \dot{x}_2(t)]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-(k_1 + k_{\text{com}})}{m_1} & \frac{k_{\text{com}}}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} & 0 \\ \frac{k_{\text{com}}}{m_2} & \frac{-(k_2 + k_{\text{com}})}{m_2} & 0 & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ -\frac{1}{m_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_1}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{x}(t)$ は状態変数であり、減衰力を入力 $u(t)$ に選んだ。式 (3.61) は、式 (3.1) の制御対象のモデルから建物の正背面にあるそれぞれ固有の粘性減衰力と制震デバイスの粘性減衰力とを分離した式となっている。入力 $u(t)$ は式 (3.62) および式 (3.63) で示され、この制御系では、 $c_{\text{damper}}(t)$ の値を決定する制御器を設計する。 $u(t)$ は、次式で与えた。

$$u(t) = c_{\text{damper}}(t)v(t) \quad (3.62)$$

$$v(t) = \dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t) \quad (3.63)$$

ここで、 $v(t)$ は質点 m_1 に対する質点 m_2 の相対速度、 $c_{\text{damper}}(t)$ は制震デバイスの粘性減衰係数である。このデバイスの粘性減衰係数は、先述のように双方向スイッチに入力するPWM信号を調整することで変化できる。これは、高速なスイッチング動作で粘性減衰係数を変化させられるということを示しており、粘性減衰力を変化させることでセミアクティブな制震が可能となり、建物の状態に応じて減衰力を変化できる。

先述した通り、 $c_{\text{damper}}(t)$ の値は、2章の制震デバイスの粘性減衰係数の関係より120[Ns/m]から230[Ns/m]の範囲で変化させられる。スライディングモード制御の考え方に基づき、振動状況に応じて粘性減衰係数をこの範囲で変化させる必要がある。

3.3.2 切換超平面の設計

式 (3.60) の状態方程式に対応する切換え関数 σ を次式に示す。

$$\sigma(t) = \mathbf{S}\mathbf{x}(t) \quad (3.64)$$

ここで、 \mathbf{S} は切換え超平面の傾きを表す。切換え超平面の傾き \mathbf{S} の設計法には、固有ベクトルによる設計法を用いた。

制御パラメータを決定するために、2章で述べた集中定数系モデルの要素を表 3-1 のように定めた。ここでは、脇田らの方法²⁶⁾に基づいてパラメータを決めた。本システムは 1 入力 4 次システムのため、非零固有値数が 3 個必要になる。ここで、非零固有値を $\mathbf{J} = \text{diag}[-0.2 \quad -0.25 \quad -0.3]$ とし、行列 \mathbf{L} は、 $\mathbf{L} = [1 \quad 1 \quad 1]$ とする。

表 3-1 集中定数系モデルのパラメータ

m_1 [kg]	5	m_2 [kg]	3
k_1 [N/m]	1800	k_2 [N/m]	1800
c_1 [N s/m]	100	c_2 [N s/m]	100
k_{com} [N/m]	3600		

表 3-1 の値を式 (3.61) の \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{E} に代入すると次の通りになる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1080 & 720 & -20 & 0 \\ 1200 & -1800 & 0 & -33.33 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.2 \\ -0.3333 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 360 \\ 600 \end{bmatrix}$$

ここで、式 (3.41) を整理すると

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} -2.825 \times 10^{-4} & -2.837 \times 10^{-4} & -2.849 \times 10^{-4} \\ -3.142 \times 10^{-6} & -3.945 \times 10^{-6} & -4.755 \times 10^{-6} \\ 5.650 \times 10^{-5} & 7.092 \times 10^{-5} & 8.546 \times 10^{-5} \\ 6.284 \times 10^{-7} & 9.862 \times 10^{-7} & 1.427 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

となる。ここで、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}^g \\ \mathbf{B}^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.252 \times 10^4 & 4.482 \times 10^8 & 2.452 \times 10^7 & 1.471 \times 10^7 \\ 8.344 \times 10^4 & -8.911 \times 10^8 & -4.882 \times 10^7 & -2.929 \times 10^7 \\ -3.452 \times 10^4 & 4.429 \times 10^8 & 2.430 \times 10^7 & 1.458 \times 10^7 \\ 1.250 \times 10^{-4} & 104 & 5.778 & 0.4667 \end{bmatrix}$$

が得られる。そして、 $\mathbf{S} = \mathbf{B}^g$ から $\mathbf{S} = [1.25 \times 10^{-4} \quad 104 \quad 5.778 \quad 0.4667]$ となる。

3.3.2 スライディングモードコントローラ的设计

次に制御則を设计する。制御則は、自由階層制御法の加速率到達則を用いて设计した。先述した通り、この方法は、システムの状態の超平面に到達する時間が短く、優れたロバスト性を持つ制御方法である。また、制御入力のエネルギーも少なく、チャタリング現象の対策ができる。加速率到達則を次式に示す。

$$\dot{\sigma} = -Q|\sigma|^\alpha \text{sgn}(\sigma) \quad (0 < \alpha < 1) \quad (3.65)$$

ここで、 $Q=100$ 、 $\alpha=0.98$ とした。したがって、必要な制御入力 $u'(t)$ は

$$u'(t) = -(\mathbf{SB})^{-1}\{\mathbf{SAx}(t) + 100|\sigma|^{0.98}\text{sgn}(\sigma)\} \quad (3.66)$$

$$0 < \alpha < 1$$

となる。この $u'(t)$ から $c_{\text{damper}}(t)$ の値が決定される。 $c_{\text{damper}}(t)$ は、下記の近似式を用いて値が決定される。

$$y = 0.52w + 124 \quad (1 \leq w < 90) \quad (3.67)$$

$$y = 6.34w - 404 \quad (90 \leq w \leq 99) \quad (3.68)$$

この近似式は、第2章の図2-28で示された粘性減衰係数の特性から導かれた式である。この、 $c_{\text{damper}}(t)$ の値が230[Ns/m)を超える場合には、Duty比を99%とした。

3.4 本章の結論

本章では、木造住宅の数式モデル化と制御系の設計について報告してきた。

制御対象は、複数世帯が共有する木造住宅とした。この住宅は木造の長屋を想定しており、壁を共有とした構造になっている。一世帯だけ壁を耐震補強すると柱に力が集中することで倒壊する可能性がある。そこで、外部から入力される振動に応じて減衰力を変化することができるセミアクティブ制震システムを考える必要がある。この減衰力を可変させる制御を実現するため、スライディングモード制御理論に基づいた制御系を設計した。切換超平面の設計には、固有ベクトル配置法を用いて行った。また、スライディングモードコントローラの設計には、自由階層制御法の加速率到達則を用いて行った。したがって、これらの方法に基づき切換関数のすべり S とスライディングモード制御コントローラを設計した。

参考文献

- (1) K. Iwanami, K. Suzuki and K. Seto, "Studies of the Vibration Control Method of Parallel Structures (The Method by the Theory of P, T, Q)", Transactions of the Japan society of mechanical engineers. C, Vol.52, No.484, 3063 / 3072 (1986)
- (2) 蔭山 満, 安井 譲, 背戸一登: 連結制震の基本モデルにおける連結バネとダンパーの最適解の誘導, 日本建築学会構造系論文集, Vol.65, No.529, pp.97-104, 2000
- (3) A Gonzalez-Buelga, L R Clare, S A Neild, J Z Jiang and D J Inman, "An electromagnetic inerter-based vibration suppression device", Smart Materials and Structures, Vol.24, No.5, pp.1-10, 2015
- (4) O. Ohnuki, K. Nonami, H. Nishimura and Y. Ariga, "Sliding Mode Control of Multi-Degree-of-Freedom Structure by Means of Sensorless Active Dynamic Vibration Absorber", Transactions of the Japan society of mechanical engineers. C, Vol.63, No.606, 8 / 14 (1997)
- (5) Alan S. I. Zinober(ed.): "Variable Structure and Lyapunov Control" Springer Berlin,(1994)
- (6) Yan, H., Li, J. F., Nouri, H. & Xu, L. L. U-model-based finite-time control for nonlinear valve-controlled hydraulic servosystem. Math. Probl. Eng. <https://doi.org/10.1155/2020/7083639> (2020)
- (7) 野波健蔵, 田宏奇: スライディングモード制御-非線形ロバスト制御の設計理論-, コロナ社, 1994

4 章 シミュレーション結果

本章では、3章で設計した制御系を図3-2の集中定数系モデルに組み込んだときのシミュレーション結果について記述する。シミュレーションソフトには、MATLAB/Simulink (Ver. 2020b) を使用した。

本章の前半では、木構造物の特性について述べる。木構造物の特性を知ることで、耐震設計の指標を定めることができる。この指標により、シミュレーションで求められた変位が耐震設計の基準を満たしているかを確認することができる。木構造物の耐震設計の基準値を求めることが課題となる。

本章の後半では、制御対象のモデルに外乱を与えたときでシミュレーションした結果について述べる。制御している場合と制御していない場合の変位をそれぞれ比較し、制御性能の有効性を示すことが課題となる。

4.1 建築構造の耐震設計

新耐震設計法は、1978年の宮城県沖地震の災害を受け、建築基準法の改正から定められた建築物を設計するときに使用されるものである。ここでは、木構造物を中心に記述する。

4.1.1 新耐震設計法⁽¹⁾⁽²⁾

新耐震設計法は、耐震の目標2つに分け「中地震動に対しては建築物の被害は軽微」、「大地震に対しては建築物の崩壊を防止し、人命の安全を確保する」と掲げている。整理すると、比較的頻度の高い中地震動に対しては被害を最小限に抑え、建物の損傷を軽微なものにする。また、大地震動（関東大震災級の極稀な地震）に対しては、ある程度の被害を許容するが、建物の崩壊を抑え、住民が負傷しても命に係わることはないようにする。これらの目標は、中地震に対する設計を1次設計、大地震に対する設計を2次設計と呼ぶ。

新耐震設計の目標を達成するために、以下の5つの設計手法が用いられる。

(i) 構造規定

構造部材の最小寸法、鉄筋コンクリート造の最小鉄筋量など構造計算に関わらず、すべての建築物に適用される。

(ii) 許容応力度設計

中地震動によって生じる建築物各部の応力度が短期許容応力度を越えないことを確認する。

(iii) 層間変形角

地震動による建築物の変形によって仕上材などが大きな被害を受けないようにする。

(iv) 偏心率，剛性率等

地震動によって構造物一部が大きく振動し，その部分に被害が集中することを防ぐ。さらに，建築物が適切な強度と靱性を有するようにする。

(v) 保有水平耐力

建築物の崩壊時の水平耐力を計算し，大地震動に対する安全性を確認する。

実際の設計においては，以上の 5 つの設計手法をすべての建築物に対して用いるのではなく，建築物の規模や高さに応じて適宜組み合わせている。

本研究では，(iii) 層間変形角の手法に基づいて制御系の性能を評価する。

4.1.2 木構造物の層間変形角⁽³⁾

建物に地震動のような水平力が作用すると、垂直断面は図 4-1 のように変形する。このとき、各階で変形する角度を層間変形角と呼ぶ。ここで、 h_1 は 1 階の高さ、 h_2 は 2 階の高さ、 δ_1 は 1 階の水平変形量、 δ_2 は 2 階の水平変形量をそれぞれ示している。層間変形角は、建物の剛性の指標として用いられる。

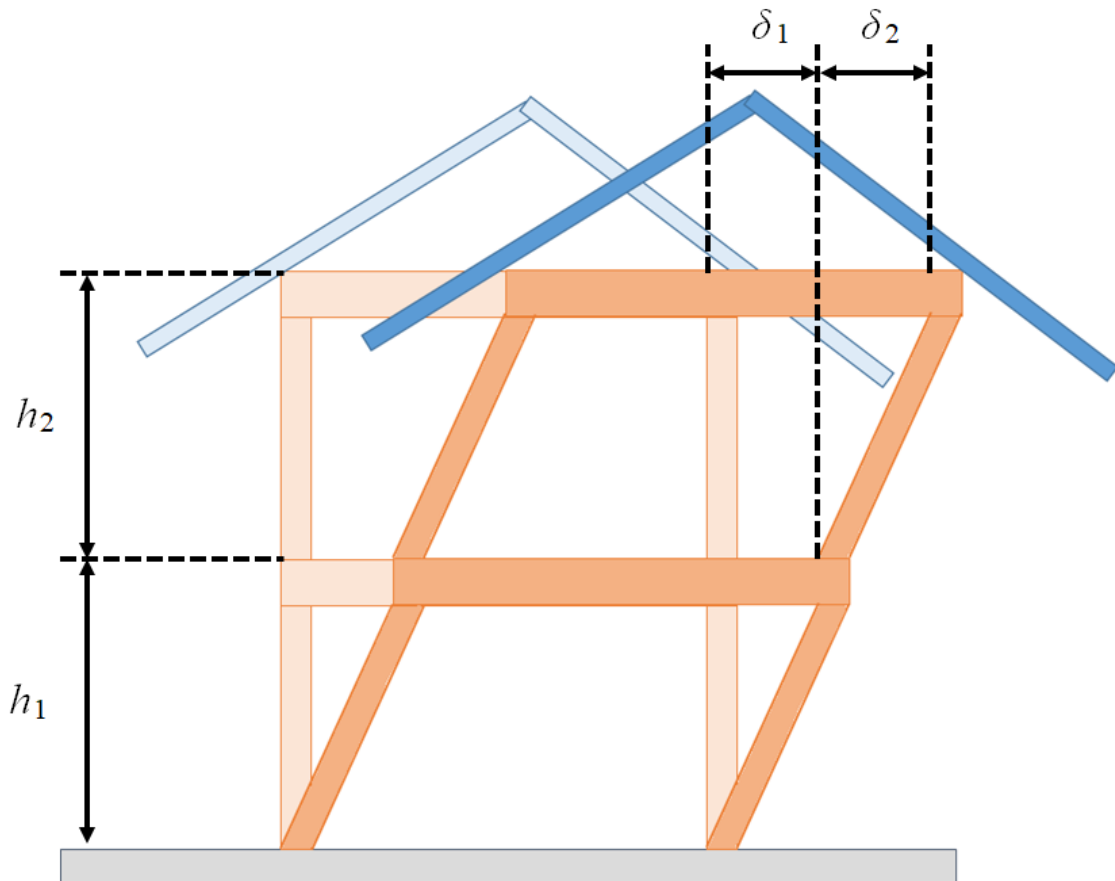


図 4-1 層間変形角

層間変形角は次の計算で求められる。

$$\varphi_1 = \frac{\delta_1}{h_1} \quad (4-1)$$

$$\varphi_2 = \frac{\delta_2}{h_2} \quad (4-2)$$

ここで、 φ_1 [rad]は 1 階の層間変形角、 φ_2 [rad]は 2 階の層間変形角を示す。木造の層間変形角の制限は表 4-1 の通りである。表より、木造の層間変形角の制限値は、震度 6 弱以下の中地震動では 1/120[rad]以下、大地震動では 1/30[rad]以下となるように規定されている。

本研究は、木造住宅の倒壊を防ぐことを目標としているので、2次設計にあたる $1/30[\text{rad}]$ 以下になるように設計する。

表 4-1 耐震設計の基本理念

設計方針	木造の層間変形角
稀に生じる中地震に対して、建物は損傷しない（1次設計）	$1/120 [\text{rad}]$ 以下
極稀に生じる大地震に対して、建物の損傷は免れないが、倒壊せず人命と財産を守る（2次設計）	$1/30 [\text{rad}]$ 以下

4.2 シミュレーション結果

3章で記述した状態空間モデルに設計した制御系を組み込んだときにシミュレーションを行った。シミュレーションは連続時間系のモデルで行い、外乱には、阪神淡路大震災の地震の変位を用いた。外乱 $z(t)$ を図 4-2 に示す。

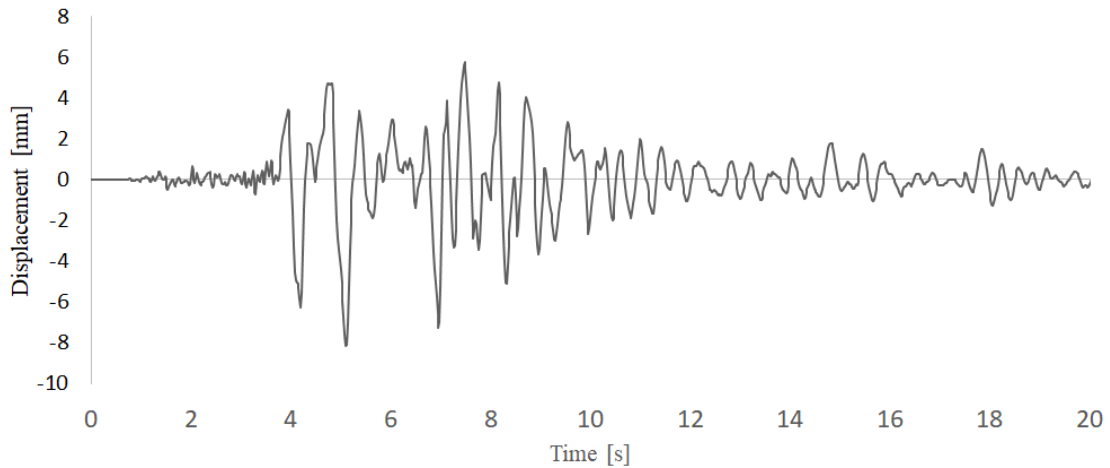


図 4-2 外乱 $z(t)$ の変位

図 4-3 にシミュレーション結果を示す。実線は制御した場合であり、破線は制御していない場合の変位をそれぞれ示している。図より、制御している場合の最大振幅は約 23[mm]、制御していない場合の最大振幅は約 47[mm]となった。結果より、制御を行うことで、制御を行わなかったときと比べて振幅を最大約 24[mm]軽減することが確認できた。

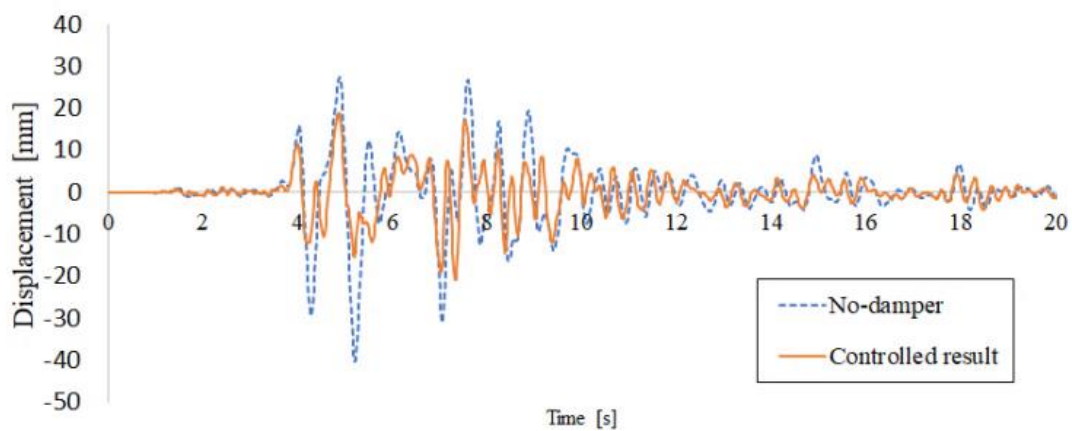


図 4-3 制御した場合と制御していない場合のシミュレーション結果

先述した通り、建物の耐震設計の基準の1つに層間変形角の値がある。木構造物の層間変形角の制限値は、1次設計の場合 $1/120[\text{rad}] (=0.083[\text{rad}])$ 、2次設計の場合 $1/30[\text{rad}] (=0.033[\text{rad}])$ 以下と定められている。層間変形角の値は、「水平変形量÷階層の高さ」から求めることができる。例えば、一般的な平屋の階層の高さを $2800[\text{mm}]$ としたときで変形量について考えると、1次設計の場合の変形量は $23.3[\text{mm}]$ 以上、2次設計の場合の変形量は $93.3[\text{mm}]$ 以上になると制限値を超えることになる。シミュレーション結果より、制御した場合の最大振幅が約 $23[\text{mm}]$ になっているので、1次設計の制限値内に抑えることができている。2次設計の場合は、制御している場合と制御していない場合のどちらも対応している。

次に、地震が発生して壁の一部が崩れたときを想定したシミュレーションを行った。このシミュレーションは、地震動が入力された5秒後に、質量とばね定数、粘性減衰係数の値をそれぞれ1割減少させて行った。図4-4にシミュレーション結果を示す。矢印で示している部分から、質量とばね定数、粘性減衰係数の値を1割減少させている。図より、制御を行うことで、最大振幅を約 $22[\text{mm}]$ 軽減することができた。したがって、質量とばね定数、粘性減衰係数がそれぞれ変化したときでも振動を抑制できることを確認できた。

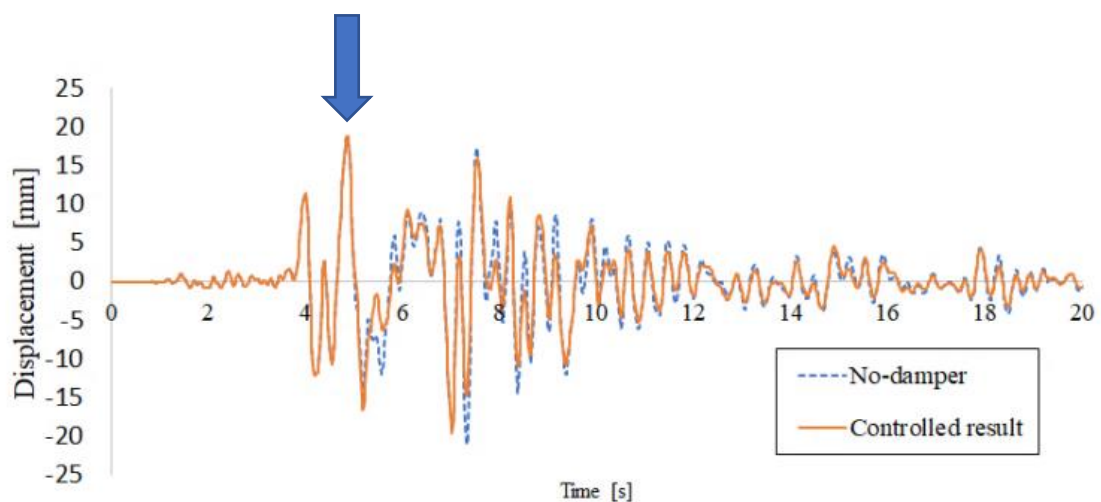


図 4-4 壁の質量・ばね定数・粘性減衰係数を1割減らした場合のシミュレーション結果

4.3 本章の結論

本章では、3章で設計した制御系を集中定数系モデルに組み込んだときのシミュレーション結果について報告してきた。

シミュレーションを行うにあたり、木建造物の耐震設計の基準を定めることにした。耐震設計には5種類の方法があり、本研究では層間変形角の手法に基づいて耐震設計を求めた。層間変形角の耐震設計の1次設計 ($1/120[\text{rad}]$ 以下) と2次設計 ($1/30[\text{rad}]$ 以下) があり、ここでは木造住宅の倒壊を防ぐことを目標とした2次設計で考えていくことにした。層間変形角の制限値は、一般的な平屋の階層の高さ $2800[\text{mm}]$ としたときで考えることにした。この値を参考にしたとき、1次設計の場合の変形量は $23.3[\text{mm}]$ 以上、2次設計の場合の変形量は $93.3[\text{mm}]$ 以上になると制限値を超えることになる。したがって、本研究は変形量が $93.3[\text{mm}]$ 以上にならない耐震設計を目指す。

シミュレーションで与える外乱は、阪神淡路大震災の変位とした。シミュレーションは連続時間系で行い、制御している場合と制御していない場合の変位を求めた。結果、制御している場合の最大振幅は約 $23[\text{mm}]$ 、制御していない場合の最大振幅は約 $47[\text{mm}]$ となった。結果より、制御を行うことで、制御を行わなかったときと比べて振幅を最大約 $24[\text{mm}]$ 軽減することが確認できた。また、制御した場合の最大振幅が約 $23[\text{mm}]$ になっているので、2次設計の制限値に抑えられ、かつ、1次設計の制限値内に抑えることができていることを確認した。

参考文献

- (1) 石山祐二：「建築構造を知るための基礎知識 耐震規定と構造動力学」，三和書籍
- (2) 大塚久哲，新井雅之，岩上憲一，高野道直，竹内幹雄，橘義規，伏婦光一，村井和彦，楊光遠：「最新地中・基礎構造の耐震設計」，北九州大学出版会
- (3) 山辺豊彦：「世界で一番やさしい木構造」，(株)エクスマッジ

5 章 実機の検証と倒壊シミュレーションの結果

本章では、木造住宅の壁の一部を模擬した構造物に制御系を組み込んだ制震デバイスを取り付けたとき、設計した制震デバイス及び制御系の評価について述べる。

本章の前半では、模擬壁に制震デバイスを取り付け、外部から振動を与えた際の壁の変位の測定結果を述べる。制震デバイスの取り付け位置と制御系の有効性について示すことが課題となる。

本章の後半では、模擬壁の変位の結果を木造住宅倒壊ソフトウェアに反映させ、木構造物の変形について述べる。本研究では、模擬家屋で実験することが困難だったため、京都大学生存圏研究所が公開しているソフトウェアを用いて建物の変形量を確認することとした。木造住宅倒壊ソフトウェアを用いて、制御している場合の建物の変形量を確認し、提案する制震デバイスと制御系の有効性について示すことが課題となる。

5.1 木構造の基本

木構造は、伝統構法や在来軸組構法など様々な構法がある。ここでは、木構造の壁を作製するにあたり、木造住宅で多く採用されている在来軸組構法を中心に記述する。はじめに、木構造の構法について述べ、次に軸組の接合について述べる。

5.1.1 木構造の構法

木構造は、軸組、耐力壁、水平構面の3要素で構成される。図5-1に在来軸組構法の基本構成を示す。この図は、木造二階建ての骨組みを示したものである。部材は大きく分けて、①地盤・基礎、②軸組、③耐力壁で分けられる。

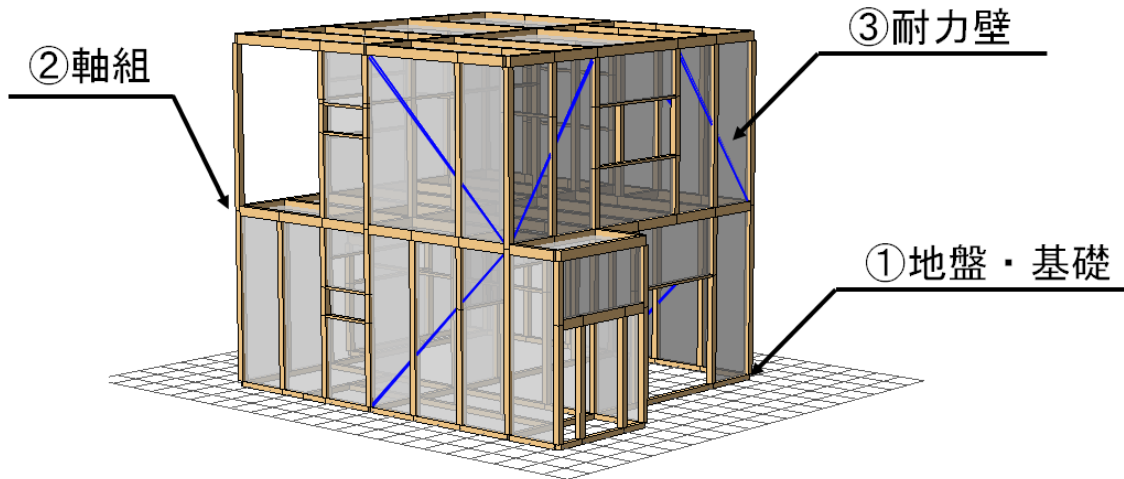


図 5-1 木造二階建ての在来軸組構法の例

①地盤・基礎

建物の重量を支え、地盤との釣り合いをとる役目を担う。図5-2は地面に住宅が建てられた例を示す。この図は基礎部分で鉛直荷重を支え、不同沈下を防ぎ、水平力を地盤に伝えている。

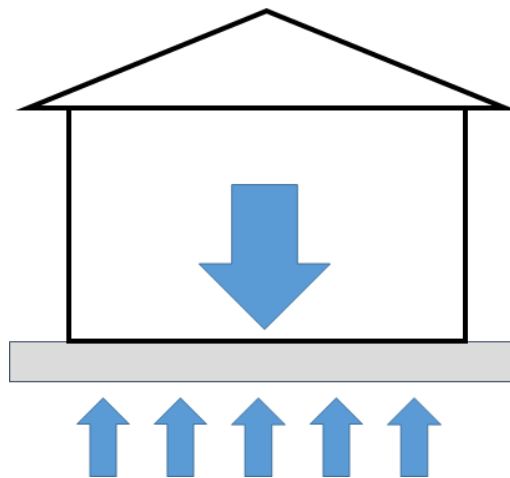


図 5-2 建物の鉛直荷重

図 5-3 は基礎部分の種類を示す。基礎は同図 (a) のような、地中梁や立ち上がりが閉じた形ものにする。同図 (b) のようなブツ切れになっていると、ヒビ割れが発生する。

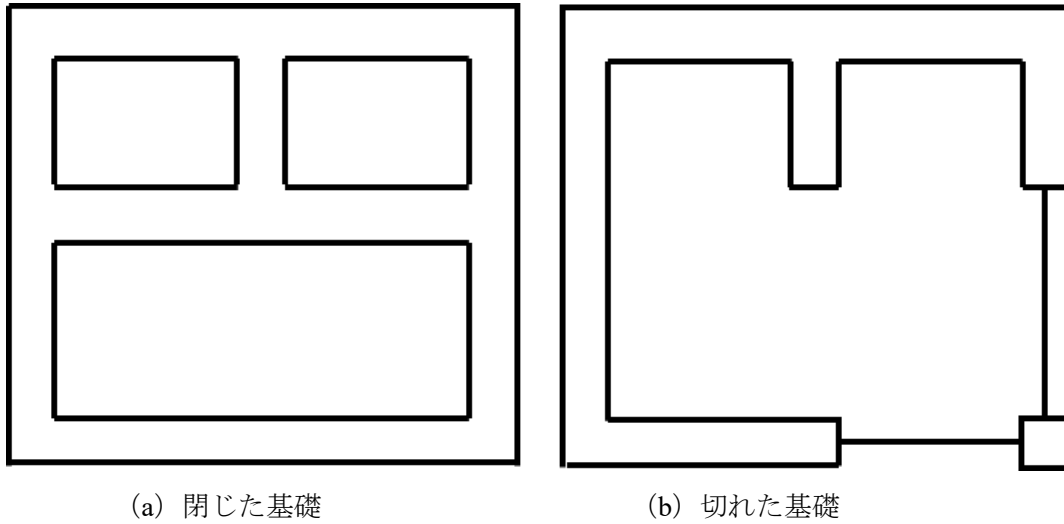


図 5-3 基礎の種類

②軸組

鉛直方向に真っすぐに建つ部材を柱、水平に置かれる部材を横架材という。中でも、断面の寸法が比較的大きな横架材を梁という。柱と梁を繋いだものを軸組といい、建物を支える最も基本的な構造材となる。図 5-2 に軸組の例を示す。この図は、柱と梁をつないだものを示している。軸組は、水平力に対して抑えることができない。

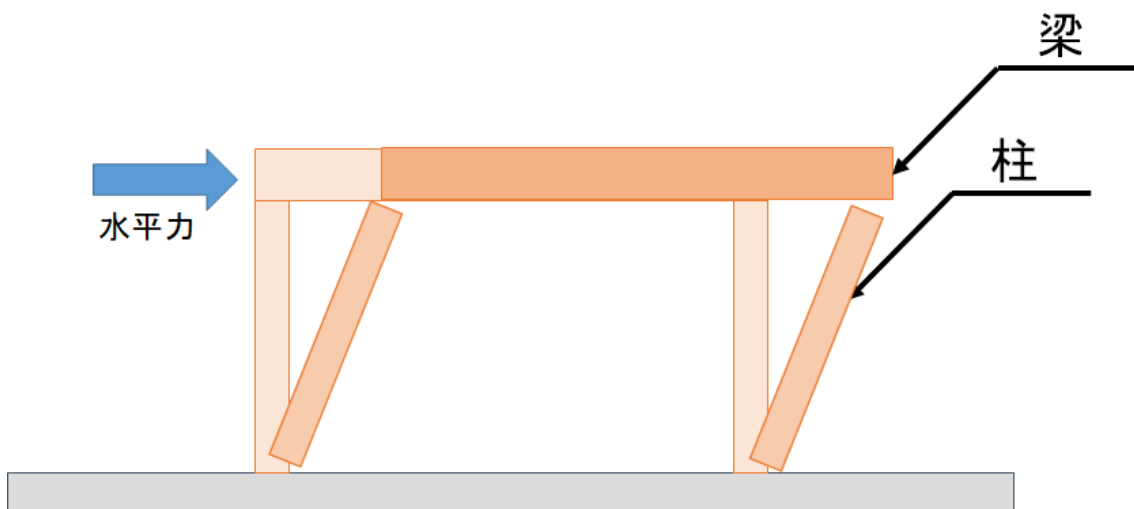


図 5-4 軸組

③耐力壁

壁の中でも、地震や強風などの水平力に抵抗する壁のことを耐力壁と呼ぶ。軸組の間に斜めに入れる筋交いは、その代表である。

一般に、軸組だけでは水平力（地震、強風など建物に横から掛かる力）に対する抵抗力が足りないため、耐力壁を設ける必要がある。図 5-5 に壁の間に筋交いを入れたものを示す。筋交いとは、軸組の体格をつなぐように設ける部材で、主に木材や鉄筋を使用する。1つの軸組に1本の筋交いを設けるものを“片掛け”，2本交差するように設けるものを“たすき掛け”という。また、筋交いを肩掛けにした壁に水平力が作用すると、その作用の方向により、筋交いに引張力または圧縮力が生じる。前者を引張筋交い、後者を圧縮筋交いと呼ぶ。

引張筋交いは、図 5-5 の片掛け筋交いに右側から水平力が作用すると生じる。このとき、軸組は平行四辺形に変形するが、筋交いは対角線が伸びる方向にあるため、釘打ち程度ではすぐに抜けてしまう。そのため接合部が抜けないように、専用の金物で留める必要がある。

一方、圧縮筋交いは、図 5-5 の片掛け筋交いに左側から水平力が作用すると生じる。このとき接合部は釘止め程度でも問題ないが、厚みの薄いほうに座屈しやすくなるため、そこから折れやすくなる。逆に、筋交いが座屈しなければ梁を突き上げてしまう。そのため、柱や梁の仕口はしっかり接合する必要がある。また、柱と同等の厚みを筋交いに設ける必要がある。

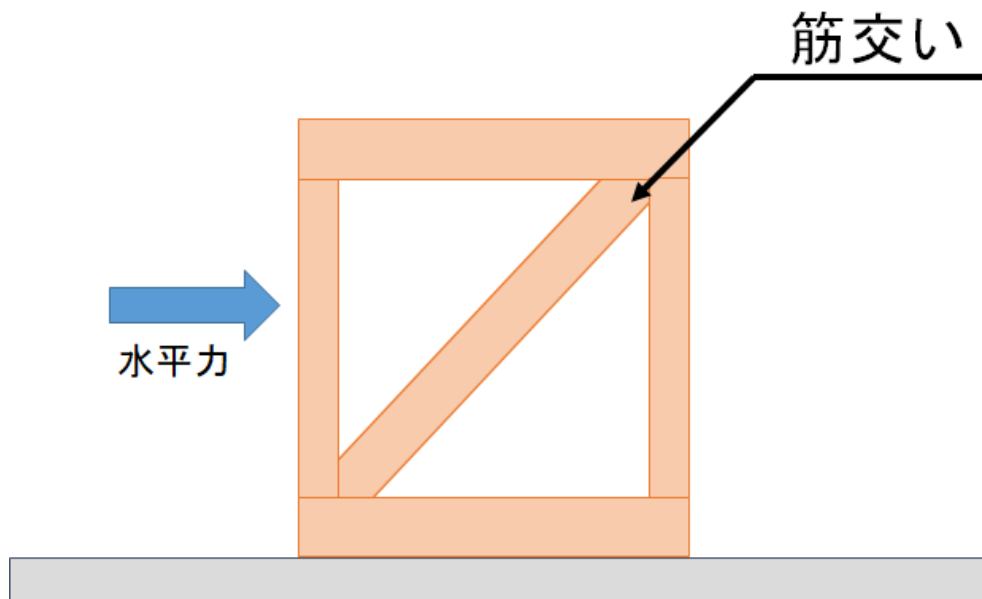


図 5-5 筋交いによる耐力壁

5.1.2 接合部の役割

接合部は、一方の部材が負担した力を、他方の部材に伝達する重要な役割を担っている。木造の場合は、他構造と比べて接合部の形状が複雑で種類も多い。さらに、建物全体の強度や変形を左右する最も重要な部分となる。

接合部の種類は、柱通しと梁通しの2つに分けられる。

○柱通しタイプ

①木材のみの接合

雇いホゾを用いて、込栓打ち^{こみせん}または車知栓締め^{しゃちせん}とする形式がある。鉛直荷重は大入れ部で支持し、込栓や車知栓で梁の抜け出しを防ぐ。

②金物を併用する接合

鉛直荷重は大入れ部で支持し、羽子板ボルトを梁の上端^{うわば}または下端^{したば}に取り付けて梁の抜け出しを防ぐ。

③金物のみの接合

柱の側面にボルトで金物を取り付けたあと、梁を落とし込みドリフトピンで接合する。この接合方法は、木材の含水率の管理を行い、寸法安定性を確保する必要がある。

○梁通しタイプ

①木材のみの接合

長ホゾに込栓打ち^{こみせん}とする方法が一般的である。込栓を打つ位置は、込栓・長ホゾ・土台または梁の耐力を考慮して決定する。

②金物を併用する接合

柱は梁に短ホゾ差しとして、羽子板ボルトや短冊金物などを使用して柱の抜け出しを防止する。

③金物のみの接合

鋼製のパイプまたはプレートを柱と梁に差し込んで、ドリフトピンを打つものがある。

建物の設計を行うときは、鉛直荷重と水平荷重を考慮する。

鉛直荷重時は、梁の継手と端部の仕口の鉛直支持耐久力が架構の耐力に影響する。具体的には、継手については曲げ耐力、端部の仕口については受圧面積の大きさを確保する。

一方、水平荷重時は、鉛直構面に関わるものと水平構面に関わるものに分けられる。鉛直構面とは、立体的に見たときの軸組のことだが、主として耐力壁に関わる接合が影響する。耐力壁は水平荷重を受けると回転が生じ、端部の柱に引抜力が作用する。よって、柱と土台、柱と床梁、柱と小屋梁などの接合部では、引張耐力を確保する必要がある。同時に、耐力壁の枠材となる梁には、圧縮・引張の軸力も生じるので、継手や梁端部の仕口の引張耐力も必要になる。

床面や屋根面のことも水平構面というが、水平力が作用すると水平構面の外周に圧縮力と引張力が生じる。これに対して、継手や仕口は引張耐力を確保する必要がある。

以上のことから、木造の接合部は建物全体の構造性能を左右する。そのため、接合形状は力の働く方向を考慮して決定する必要がある。

5.1.3 込栓の性能

接合に用いる栓や釘などのことを接合具という。木材の接合具には、込栓、車知栓、ダボ、楔などがある。

この接合に引張力が働いたときの壊れ方は、①ホゾの破壊、②込栓の破壊、③土台（梁）の破壊の3種類に分けられる。

①ホゾの破壊

込栓によりホゾの下側が割れて抜けてしまう破壊（せん断破壊）で、破壊後は急激に耐力が低下する。ホゾの引張力に対する抵抗力は、込栓より下側のホゾの断面積に比例する。よって、込栓はなるべく土台の上側に打つことでホゾの耐力は大きくなる。また、ホゾの厚みを増すことも有効である。

②込栓の破壊

ホゾと土台の境界線で、込栓が折れる（曲げせん断破壊）である。①の逆で、込栓よりホゾの強度が高いときに生じる。込栓は山形に曲がりながら折れるため、破壊後もホゾと土台の隙間に食い込んで、楔のような働きをする。そのため、破壊後の耐力低下は緩やかで粘り強い。また、柱や土台の破壊では補修工事は大掛かりになるが、込栓の破壊は建て起こしてから込栓を交換すればよく、比較的軽微な工事で済む。込栓の形状は15[mm]または18[mm]の正方形か円形が一般的である。

③土台の破壊

込栓の位置から土台が繊維方向に割り裂かれる、非常に脆い破壊（せん断破壊）である。込栓が太すぎ、または込栓の位置が上側に寄っていたときに生じやすい。

以上のことから、本研究で設計する模擬壁を考えていく。ここで考えている木造住宅のモデルは、一般住宅を対象としているので在来軸組構法で行う。接合部は、梁通しの金物を併用するタイプで接合する。図 5-6 に設計する木柱の取り付け方法を示す。図より、短ホゾに加工し、込栓を丸型で固定したあと、金物で固定して模擬壁を作製する。

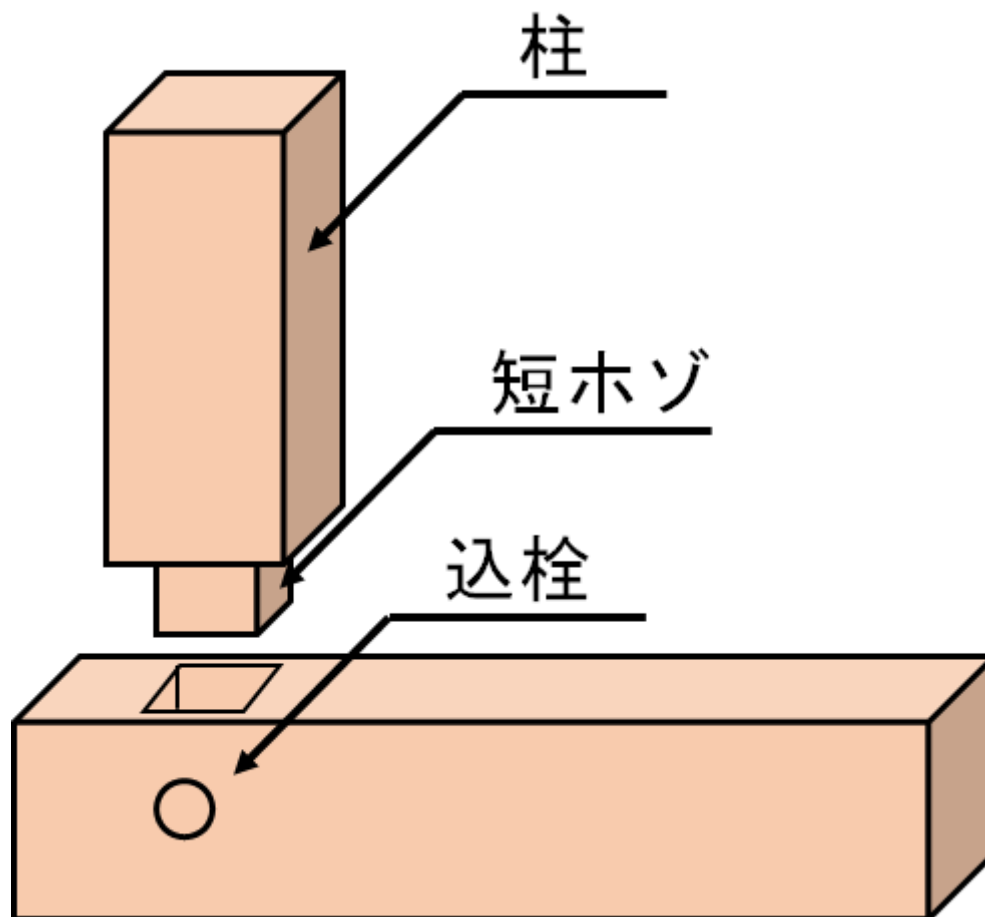


図 5-6 梁通しの金物を併用する接合

5.2 模擬壁の設計

図 5-7 に作製する模擬壁の木枠の設計図を示す。ここでは、一般的な住宅の壁の大きさを参考に断面 90[mm]×90[mm]の角材で 2085[mm]×1125[mm]の木枠を作製した。木材には、スギを選択した。木枠の取り付け部分は、木造建築で適用されているホゾ加工で木枠を取り付け、さらに金属製のアンクルで四隅を固定した。ホゾ加工とは、柱部分に溝を掘り、梁部分にあけている穴に柱部分をはめ込んで固定する方法である。ホゾ加工は、50[mm]の深さで加工した。

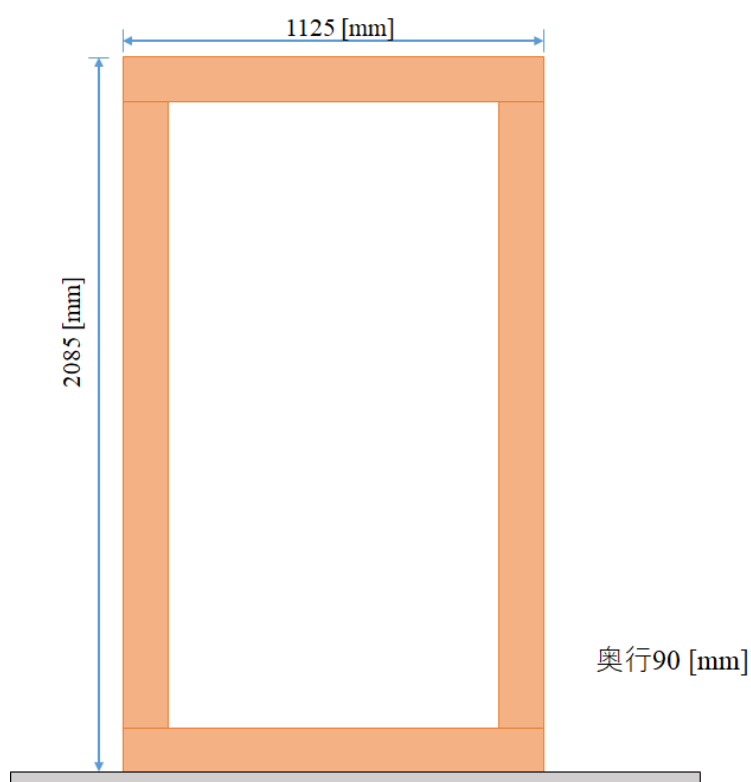


図 5-7 実験で使用する模擬壁の寸法

5.3 実験装置の概略図

図 5-8 に振動発生装置に模擬壁を取り付けた概略図を示す。この実験装置では、水平方向に移動する加振装置により振動を変えることができる。この実験装置は 2 つの家屋が共有している壁を取り出したものである。制御系設計のための制御対象のモデルは集中定数化し、家屋の正面と背面に壁の要素を入れていたが、制震デバイスの減衰力の効果を確認する方法でフレームだけを使ったものが一般的⁽¹⁾なので、ここでは木枠に制震デバイスを取り付けたもので実験した。実験機には、シミュレーションで設計した制御器を使用している。脇田ら⁽²⁾はサイズの異なる構造物を、2 自由度系の振動模型から集中定数化モデルに置き換え、パラメータ同定に関する指針を示している。このことより、この考えに基づきシミュレーションで設計した制御器のパラメータを実験機に反映させることができる。また、バランスをとるために左右の木枠の角にそれぞれ 1 つずつ制震デバイスを取り付けた。実際の木枠に設置されているパッシブなダンパは、片筋交いで入っている建造物も多いので、ここでは一方の制震デバイスのみ制御することとした。柱の上端に加速度センサ (ADXL-335, 測定範囲 $\pm 3G$) と距離センサ (ZX-LD300, 測定範囲 $\pm 300\text{mm}$) を設置した。この実験装置の水平変形量の制限値は、 $69.5[\text{mm}]$ である。

制震デバイスのコントローラは、加速度センサから得られる加速度の値を取り込み、加速度から速度に変換する。この速度の値に応じて粘性減衰係数が決定される。

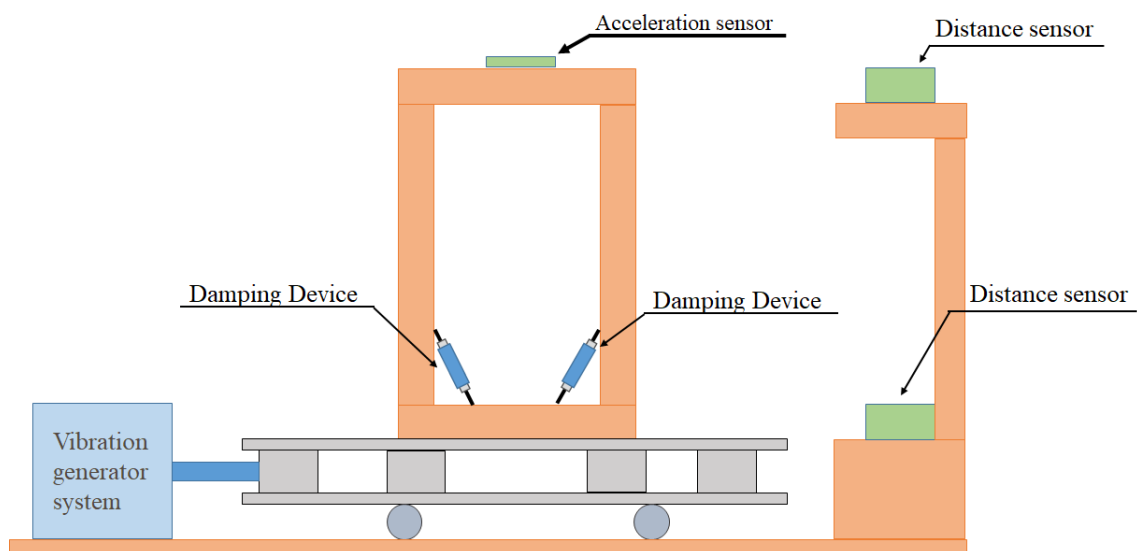
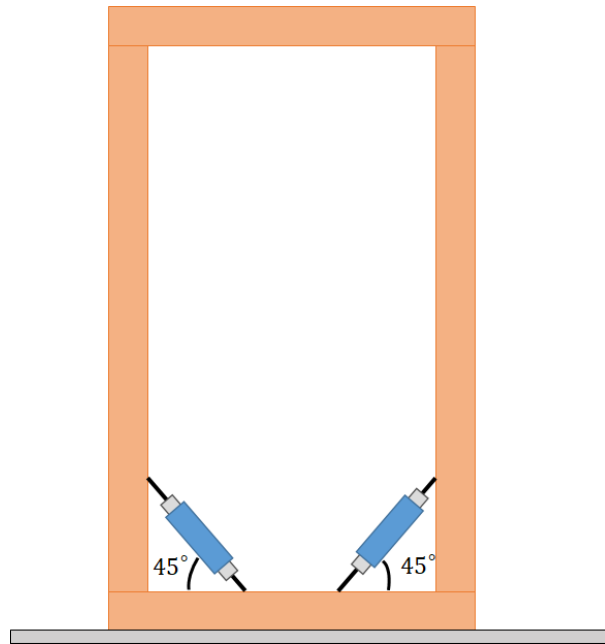


図 5-8 振動装置に模擬壁を取り付けた実験装置

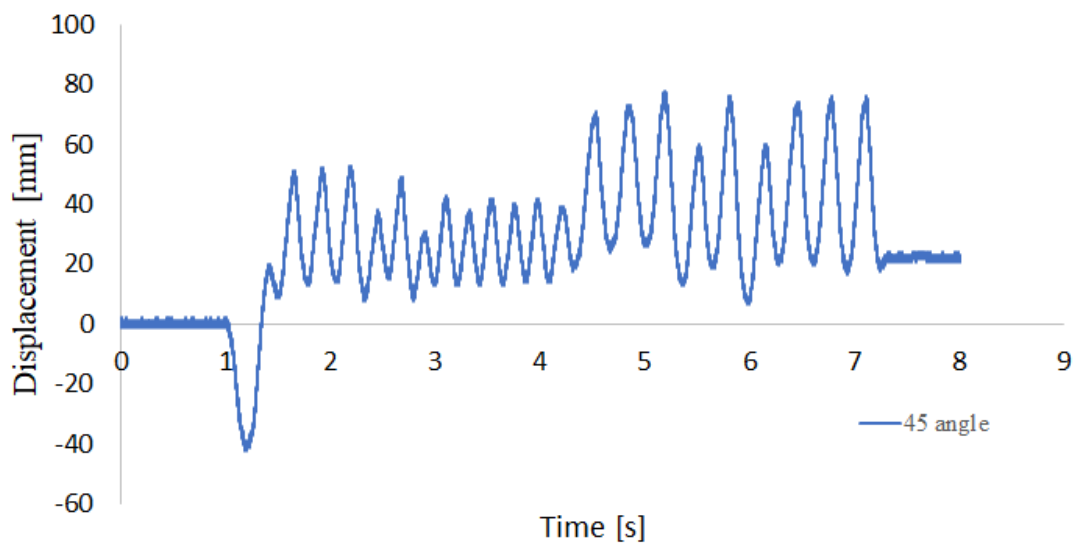
5.4 制震デバイスの取り付け角度

提案する制震デバイスは模擬壁の木枠の角に取り付けるため、取り付ける位置を決める必要がある。そこで、制御をしているときの壁の変位の大きさから取り付ける場所を決定した。取り付け場所には、45°、60°、高い位置の60°の3つの中で選ぶ。30°を外した理由は、制震デバイスの大きさの関係上取り付けが不可能だったため候補から除いた。

振動には振幅7.5[mm]の正弦波振動の周波数を1.2[Hz]から3.2[Hz]までの範囲でランダムに振動させたときで変位を測定した。図5-9～図5.11に結果を示す。

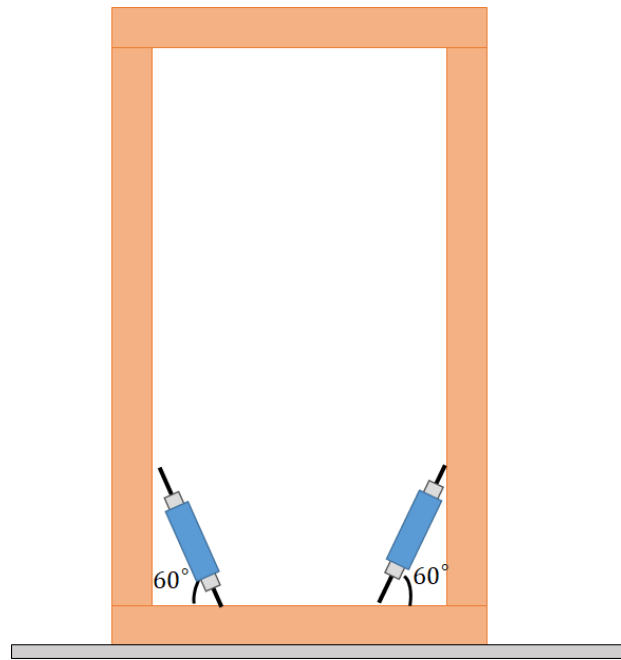


(a) 制震デバイスを 45°で模擬壁に取り付けたとき

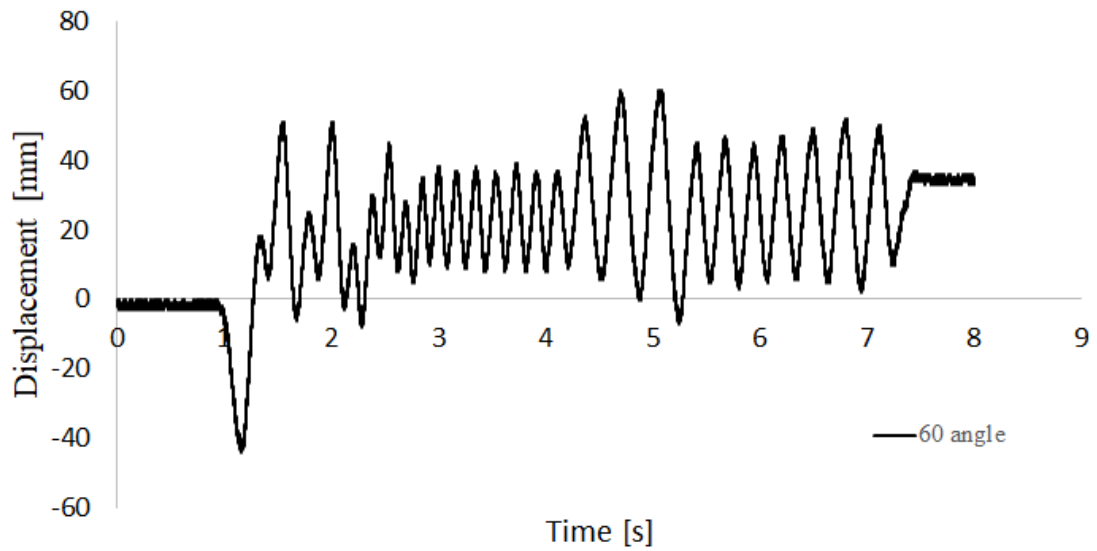


(b) 制震デバイスを 45°で取り付けたときの変位の結果

図 5-9 制震デバイスを 45°で取り付けたとき

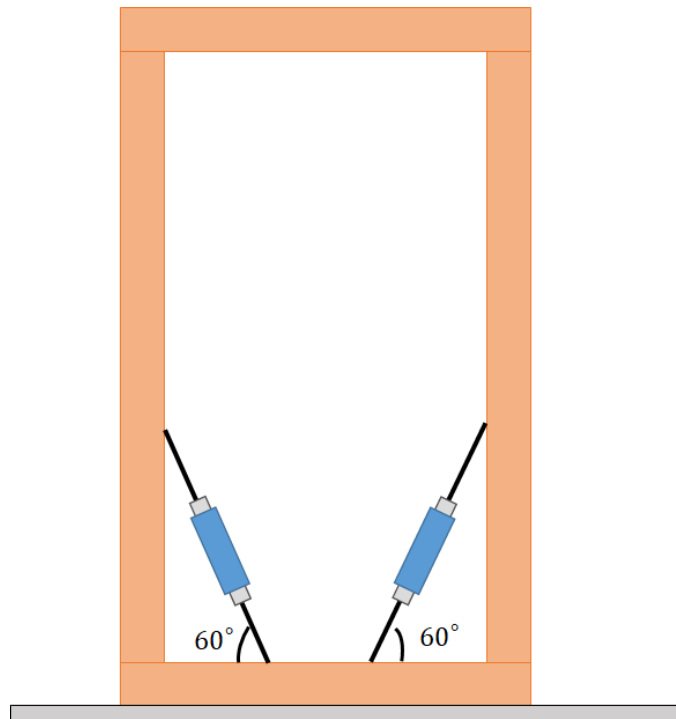


(a) 制震デバイスを 60°で模擬壁に取り付けたとき

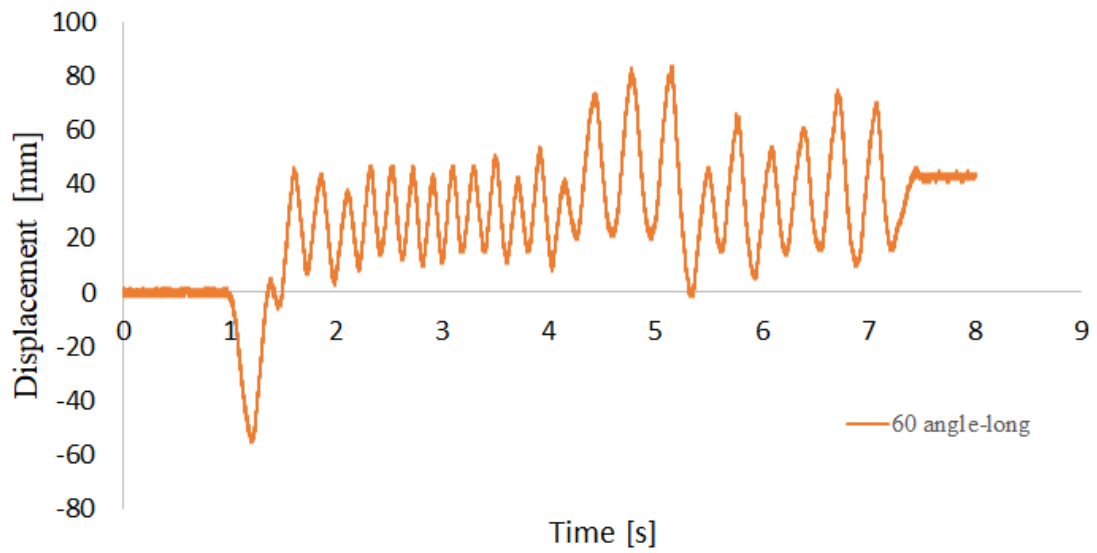


(b) 制震デバイスを 60°で取り付けたときの変位の結果

図 5-10 制震デバイスを 60°で取り付けたとき



(a) 制震デバイスを高い位置の 60°で模擬壁に取り付けたとき



(b) 制震デバイスを高い位置の 60°で取り付けたときの変位の結果

図 5-11 制震デバイスを高い位置の 60°で取り付けたとき

全ての実験結果を図 5-12 に示す。図より、45°の時の最大振幅は 78[mm]、60°の時の最大振幅は 60[mm]、高い位置の 60°の時の最大振幅は 84[mm]となった。この結果より、振幅が一番小さい結果となった 60°で制震デバイスを取り付けることにした。

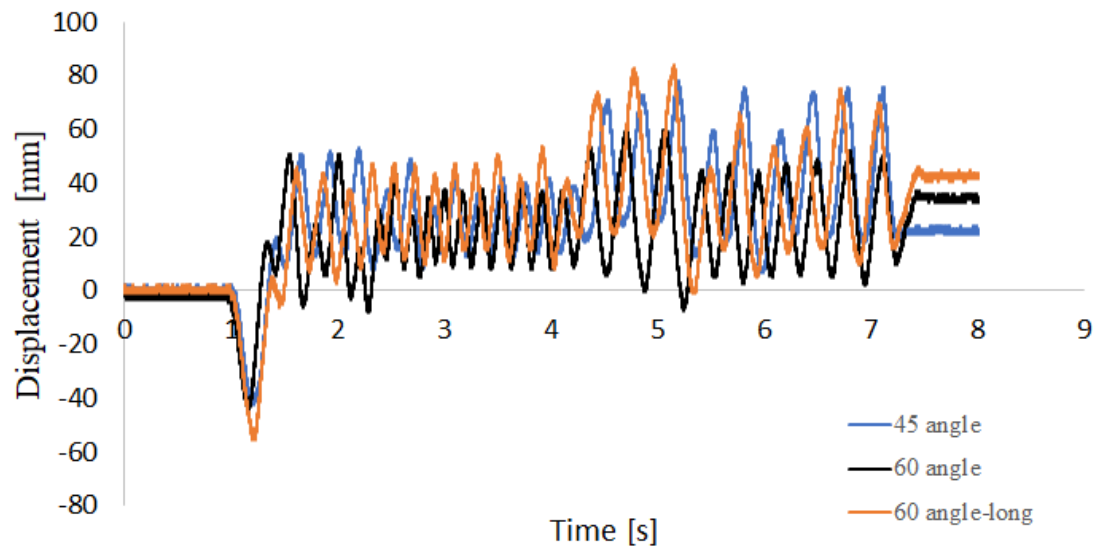


図 5-12 制震デバイスの取り付け位置を変えたときの変位の結果

5.5 実験装置の特性測定

制御実験に先立って、実験装置の周波数応答を測定した。測定には、下部に取り付けている制震デバイスの両端のコイルを開放している状態で行った。測定した結果を図 5-13 に示す。図より、共振角周波数は角周波数 ω [rad/s] が 8.5 [rad/s] ($f = 1.3$ [Hz]) のときであることがわかる。

この結果を踏まえ、模擬壁に加振するときは共振周波数を含む状態で実験する。これにより、共振周波数をズラしながら制震させる実験を行うことができる。

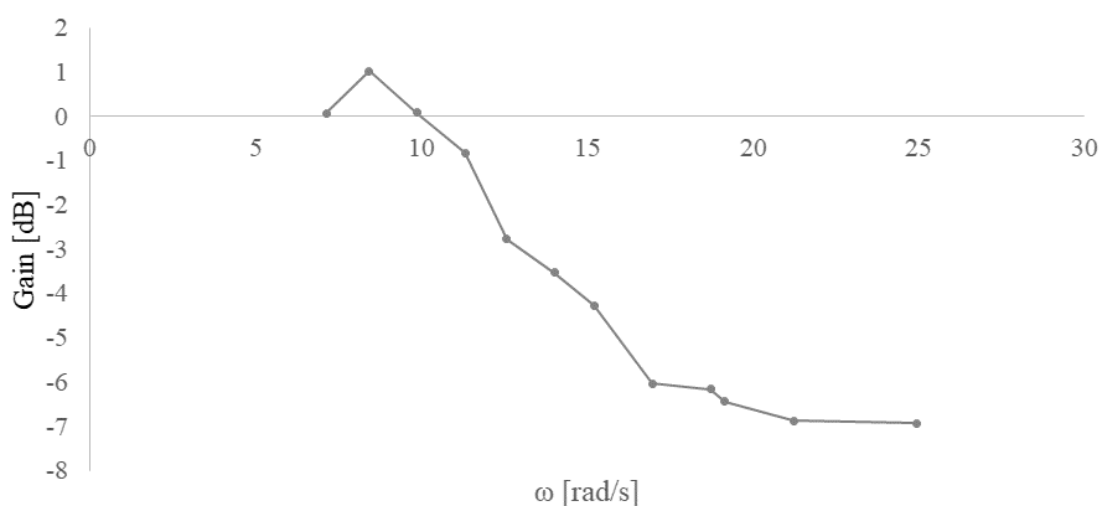


図 5-13 実験装置の周波数特性

5.6 模擬壁の変位の測定

次に、木枠に加える振動に複数の周波数成分を含ませて実験を行った。図 5-14 に実験装置を示す。ここでは、実際の地震動で多く含まれている 1.2[Hz]から 3.2[Hz]までの範囲の周波数を含むように設定した。この外乱入力信号は、周波数帯域は狭いものの複数の周波数成分が含まれており、減衰係数を変化させることで適切に振動を吸収していると考えられる。また、振幅は 15[mm]で与えている。

木枠の変位の測定実験は、木枠のみのとき、片掛筋交いのとき、Duty1%に設定したとき、Duty99%に設定したとき、制御しているときの 5 種類で測定した。測定した結果を図 5-15 から図 5-19 に示す。

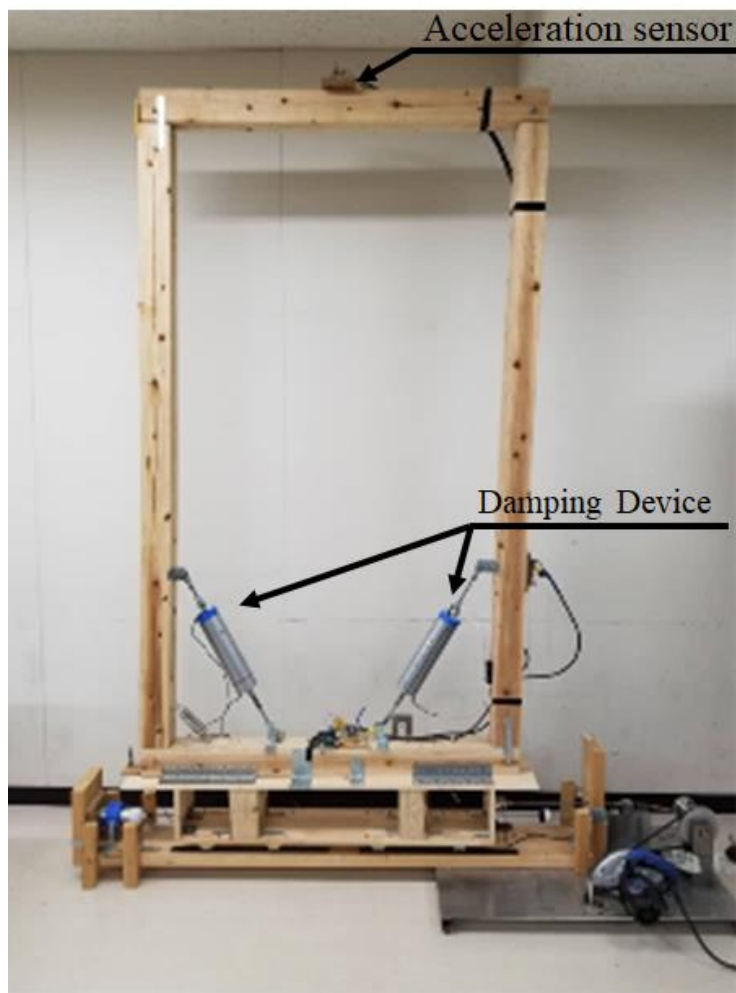


図 5-14 木造住宅の壁を模擬した実験装置

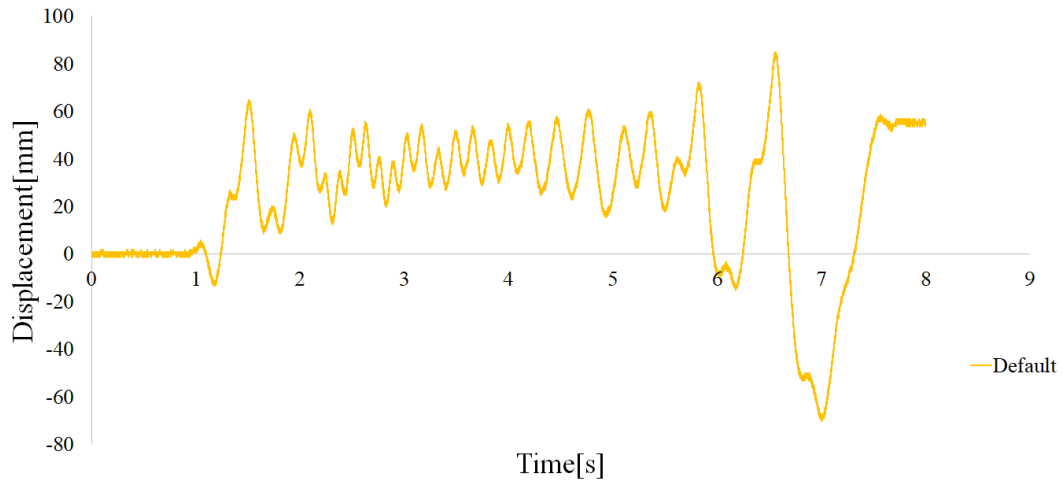


図 5-15 木柱のみの変位の結果

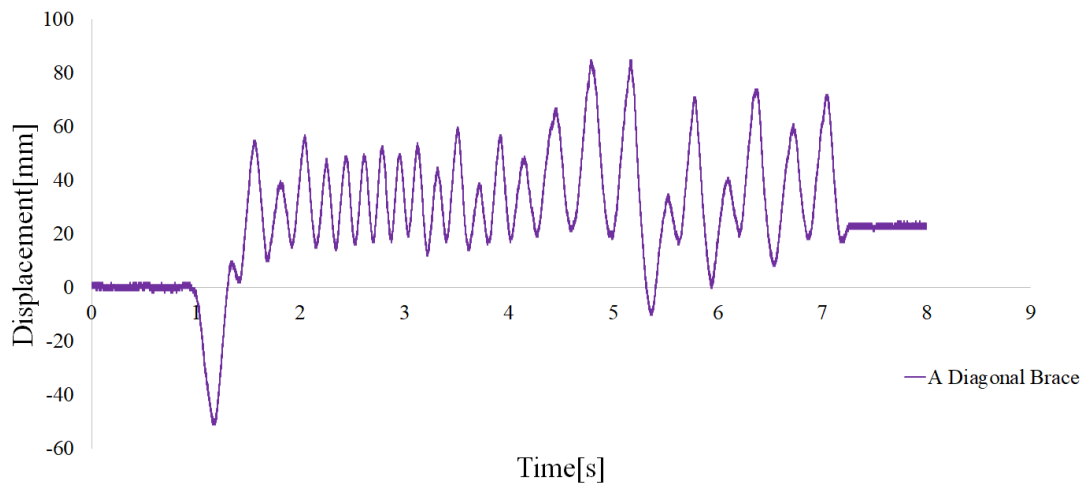


図 5-16 片掛筋交いの変位の結果

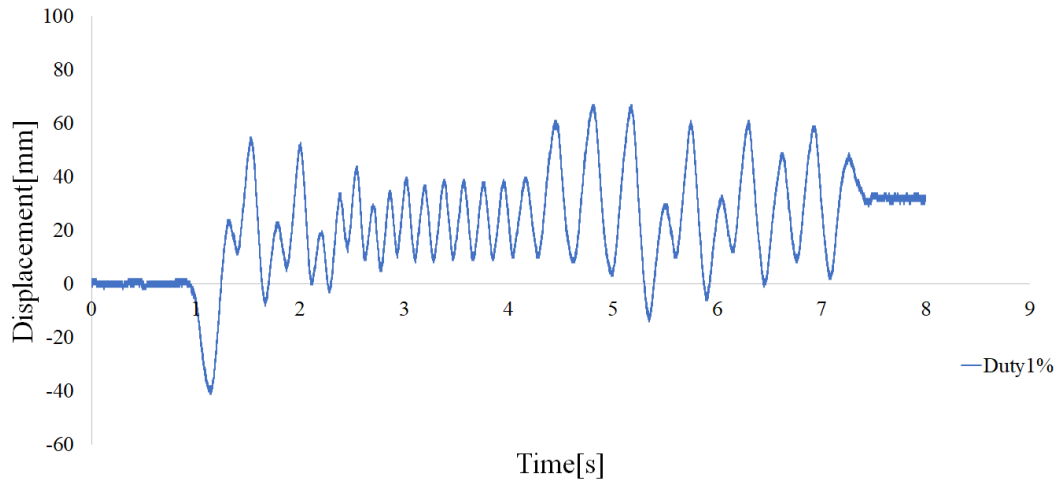


図 5-17 Duty1%のときの変位の結果

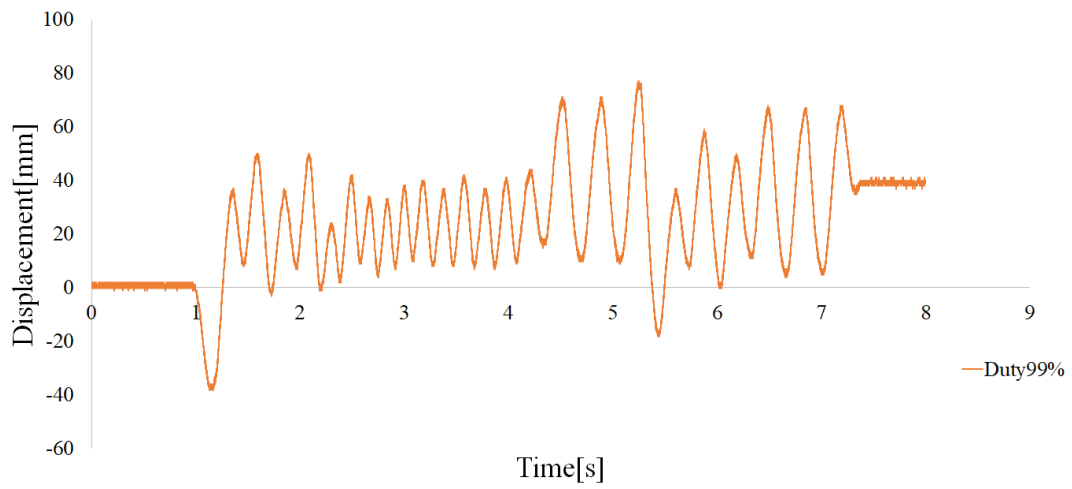


図 5-18 Duty99%のときの変位の結果

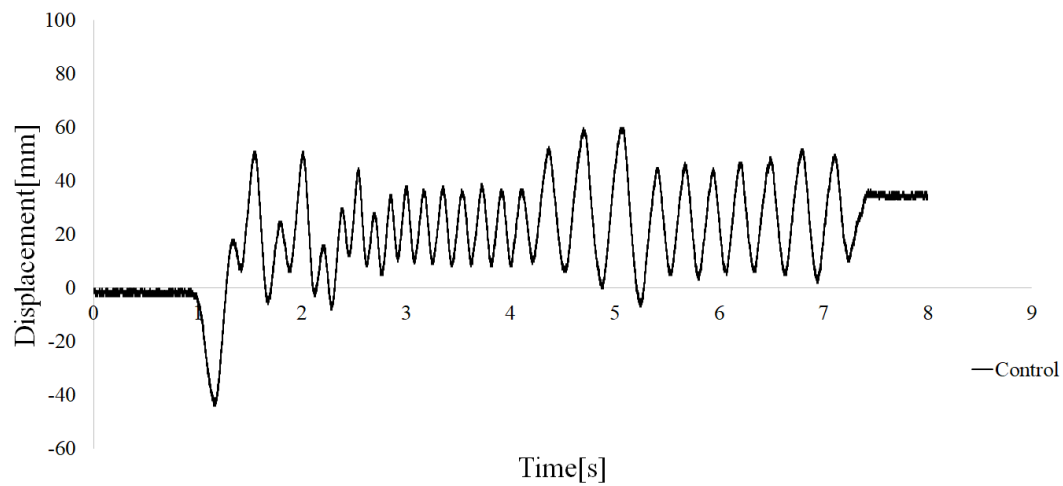


図 5-19 制御しているときの変位の結果

すべての実験結果をまとめたものを図 5-20 に示す。木枠のみの場合は、6.0 秒から 7.5 秒で大きく振動している様子が見られ、最大変位は 85[mm]となった。片掛筋交いの場合は、5.0 秒から 6.0 秒で木枠が大きく振動している様子が見られ、最大変位は 84[mm]となった。Duty 比を 1%に設定したときは、5.0 秒から 6.0 秒で木枠が大きく振動している様子が見られ、最大変位は 67 [mm] となった。Duty 比を 99%に設定したときは、最大変位は 77[mm]となり、制震デバイスの粘性減衰力が小さいときよりも振幅が大きくなった。これは、木枠に取り付けた制震デバイスの力が強かったことから、その振動エネルギーを適切に逃がすことができなかつたことが原因であると思われる。制御を行う場合、最大変位は 60[mm]となり、他 3 つの結果と比べると振幅を抑えられることが確認できた。この結果から、制御時の層間変形角を求めると $60 \div 2085 = 0.029[\text{rad}]$ であり、制限値の $0.033[\text{rad}]$ 以下となることが確認できた。以上のことから、粘性減衰係数を大きくして、木枠の耐震強度を上げるだけでは振動を大きくしてしまうが、提案した制御システムを用いることで振動を適切に抑えられることが確認できた。したがって、提案する制御システムは、脆弱な木造住宅の壁に適用することで構造物の倒壊を防ぐことが可能になると考えられる。

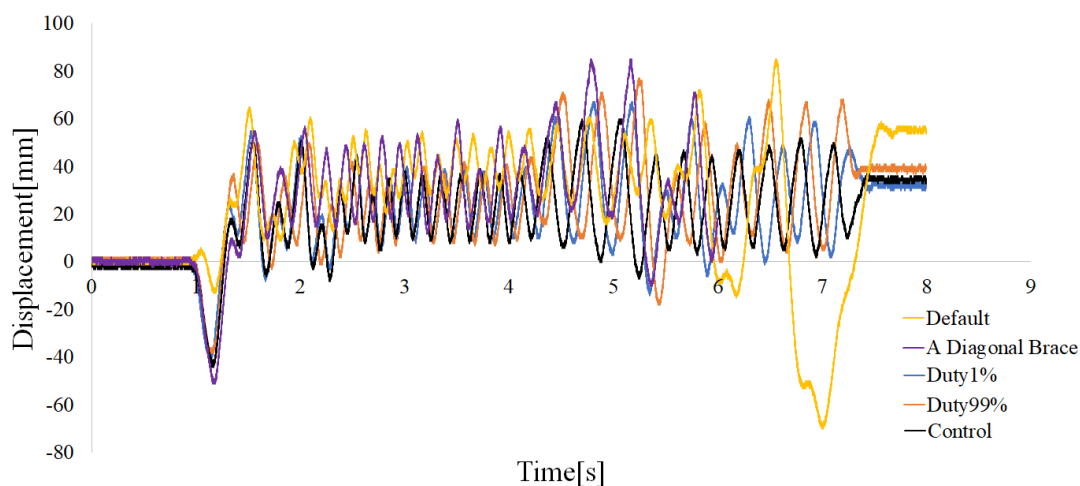


図 5-20 模擬壁による実験装置の変位の結果

5.7 木造住宅の倒壊シミュレーション

建物の一部の木枠だけを対象とした実験では、建物の倒壊を防げているのか評価しにくい
ため、京都大学生存圏研究所が公開している木造住宅倒壊ソフトウェア
「Wallstat(Ver.4.0.1)」^{(3),(4)}を用いて、構造物の変形を調べた。このソフトウェアは、木造軸
組構法住宅の建物全体の大地震時の損傷状況や倒壊過程をシミュレーションできる数値解
析プログラムである。

5.7.1 木造住宅倒壊ソフトウェア Wallstat

Wallstat は、建築研究所・国土技術政策総合研究所で地震時の木造住宅の挙動に関する知
見を活用し、建物全体の地震動時の損傷状況や倒壊可能性を評価するための倒壊解析プロ
グラムである。これまで、木造住宅の倒壊挙動を再現することは、部材の折損・飛散といっ
た極端な非線形性を考慮する必要があり困難とされていた。しかし、個別要素法を基本理論
とした解析手法によりそれが可能となった。

対象となる構造は、一般的な軸組構法で建てられた木質構造建築物を対象としている。軸
組構法であれば、大規模な集成材建築物や、中層から高層木造建築などにも応用できる。

計算プログラムは、解析モデル、パラメータ、外力条件、計算条件で構成されている。計
算された結果は、解析モデルの各階の層せん断力、各階特定点の絶対変位が出力される。ま
た、時刻歴データの保存も行われ、解析モデルの倒壊するデータも出力される。

解析モデルは、軸組、構面、筋交い、重量の4つで構成されている。この4つのデータを
合わせることで、木造住宅のモデルを設計することができる。重量は、図 5-21 のように分
けられる。各階に指定した重量は建物の高さに存在する要素の数で除され、均等に配分され
る。

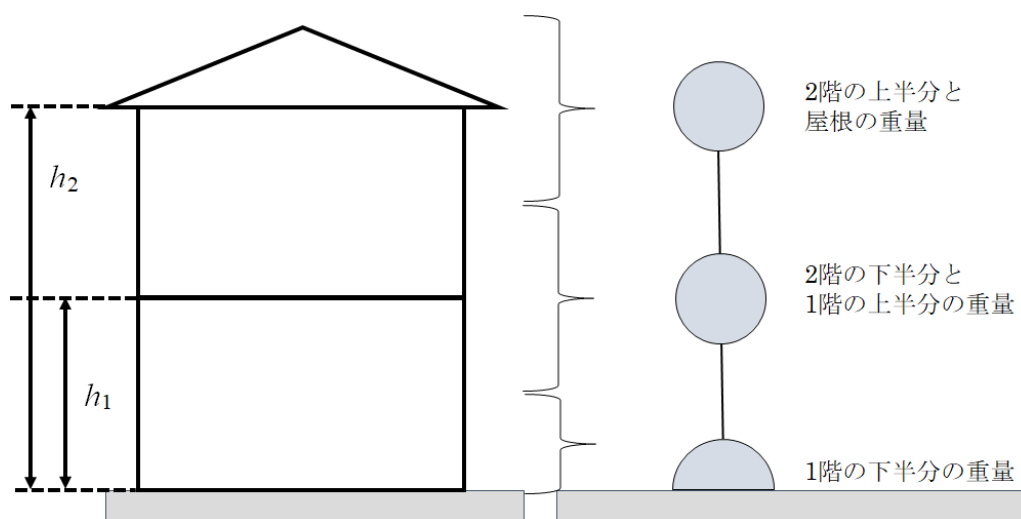


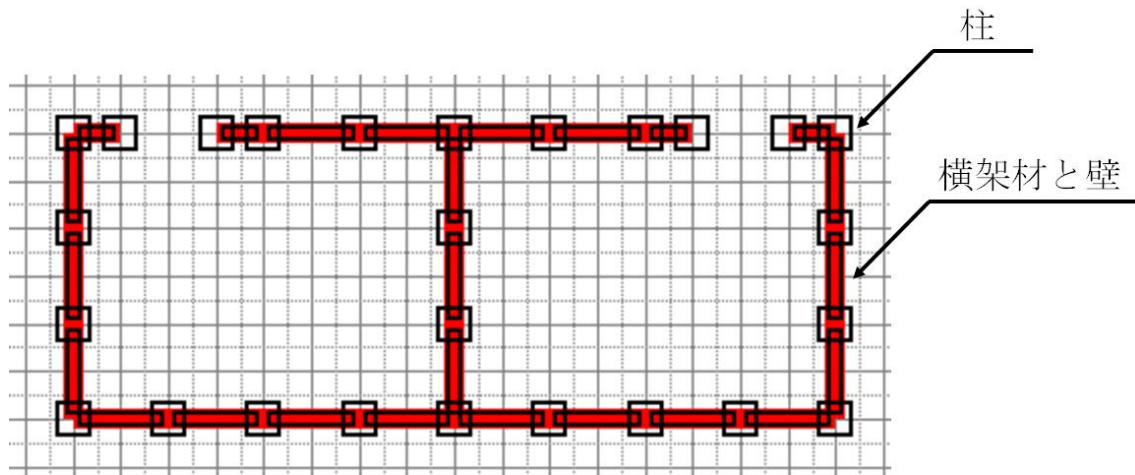
図 5-21 解析モデルの重量

パラメータは、各種バネのパラメータに対応している。バネには、軸組のバネ、接合部のバネ、構面のバネ、筋交いのバネ、制震装置のバネの設定をそれぞれすることができる。

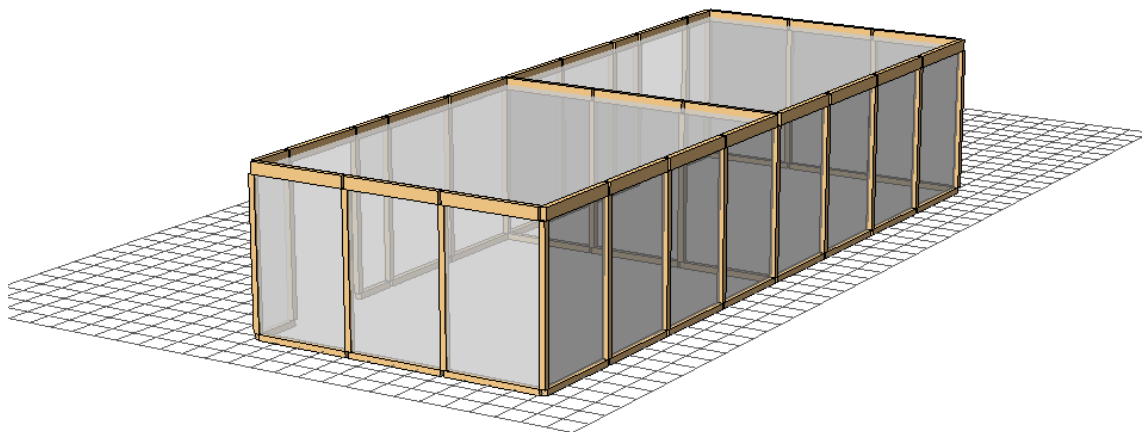
外力条件は、地震波入力、プッシュオーバー、繰り返し加力で設定することができる。地震波入力は、変位と加速度で地盤レベルに外乱を入力することができる。プッシュオーバーは、地盤レベルを固定して任意の高さに強制変位を入力することができる。繰り返し加力は、地盤レベルを固定し、任意の高さに強制繰り返し変位を入力することができる。

5.7.2 木造住宅の設計

本研究では、Wallstat (Ver.4.1) を使用した。図 5-22 に Wallstat で使用する木造住宅の図面を示す。ここで、柱と土台はスギ、壁は合板とし、建物の重量は 80 [kN] とした。



(a) 木造住宅の平面図



(b) 木造住宅の立体図

図 5-22 設計した木造住宅のモデル

5.7.3 倒壊解析

Duty比1[%]と制御した場合とを比較したときの倒壊シミュレーションの結果を図5-23に示す。実験装置のパラメータに基づいて作成した構造モデルに、実験結果から得られた変位をx方向の振動として強制的に入力したときの結果を示している。図中、手前側は制御した場合の結果を示し、奥側は粘性減衰力の小さいDuty1%の場合の結果を示している。制御している場合は、98.4 [mm]の変形になり、Duty1%の場合は倒壊した。この結果では、層間変形角が安全基準を少し上回ったものの、提案システムで減衰力を制御することで建物の倒壊を防ぐことが確認できた。

次は、従来使用されている片掛筋交と制御した場合とを比較したときの倒壊シミュレーションの結果を図5-24に示す。先ほどと同様の構造モデルに、実験結果から得られた変位をx方向の振動として強制的に入力したときの結果を示している。図中、手前側は制御した場合の結果を示し、奥側は片掛筋交の場合の結果を示している。制御している場合は、98.4 [mm]の変形になり、片掛筋交の場合は倒壊した。この結果より、提案する制震システムは従来使用されている片掛筋交より耐震補強が見込まれることが確認できた。したがって、本論文で提案した制御システムを利用することによって、脆弱な建物は地震発生後に傾きつつも倒壊しないので、その住人は逃げ出すことが可能であると思われる。

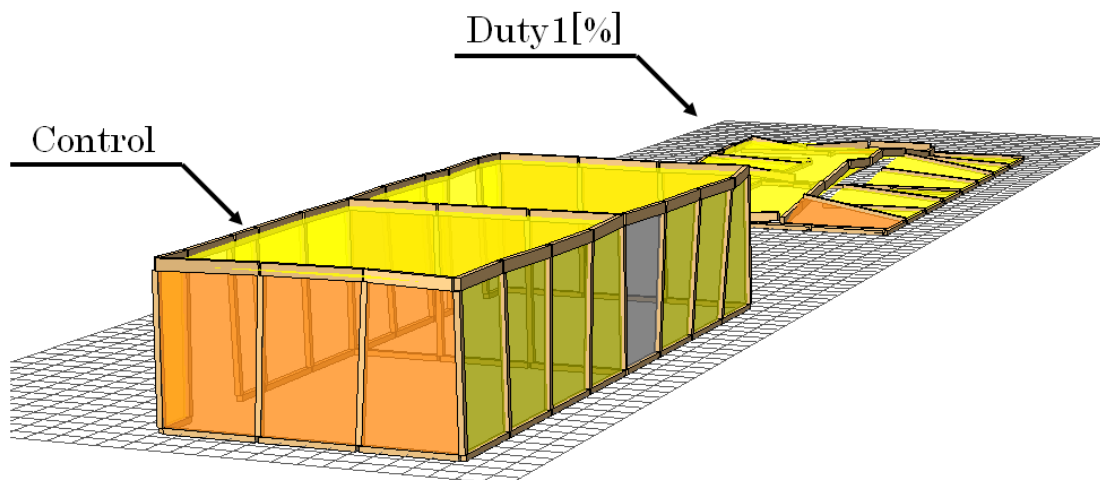


図5-23 Duty1[%]と制御した場合を比較したときの倒壊シミュレーション結果

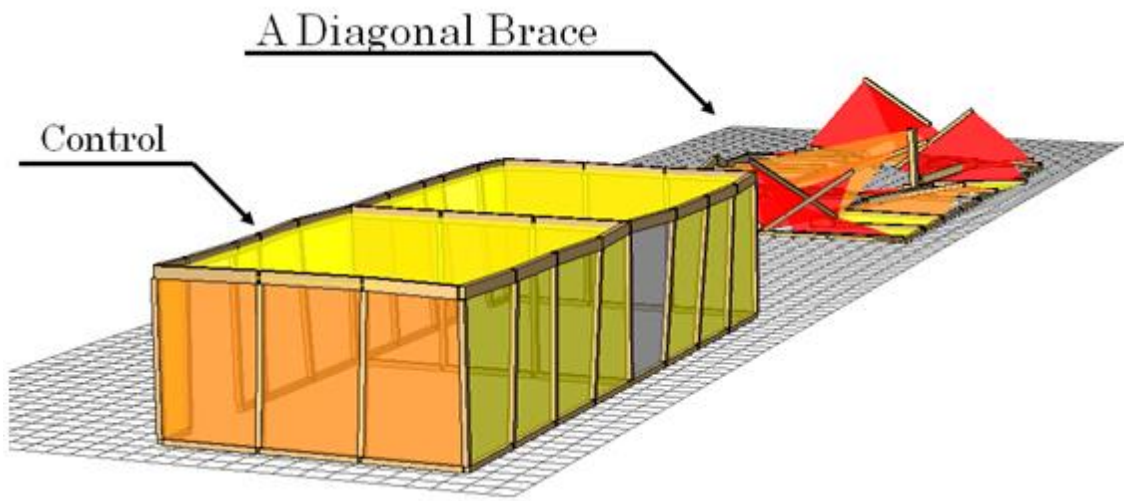


図 5-24 片掛筋交と制御した場合を比較したときの倒壊シミュレーション結果

5.8 本章の結論

本章では、木造住宅の壁の一部を模擬した構造物に制御系を組み込んだ制震デバイスを取り付けたとき、設計した制震デバイス及び制御系の評価について報告してきた。

実験は、模擬壁に外乱を与えたときの壁の変位を測定した。外乱は、実際の地震動で多く含まれている 1.2[Hz]から 3.2[Hz]までの範囲の周波数を与えた。また、振幅は 15[mm]で与えた。測定は、木枠のみの場合と Duty1%の場合、Duty99%の場合、制御している場合の 4 種類で行った。木枠のみの場合、最大変位は 85[mm]となった。Duty 比を 1%に設定したとき、最大変位は 67 [mm] となった。Duty 比を 99%に設定したとき、最大変位は 77[mm]となった。この結果より、制震デバイスの粘性減衰力が小さいときよりも振幅が大きくなった。これは、木枠に取り付けた制震デバイスの力が強かったことから、その振動エネルギーを適切に逃がすことができなかつたことが原因であると思われる。最後に制御を行う場合、最大変位は 60[mm]となり、他の 3 つの結果と比べると振幅を抑えられることが確認できた。この結果から、制御時の層間変形角を求めると $60 \div 2085 = 0.029$ [rad]であり、制限値の 0.033[rad]以下となることが確認できた。以上のことから、粘性減衰係数を大きくして、木枠の耐震強度を上げるだけでは振動を大きくしてしまうが、提案した制御システムを用いることで振動を適切に抑えられることが確認できた。したがって、提案する制御システムは、脆弱な木造住宅の壁に適用することで構造物の倒壊を防ぐことが可能になると考えられる。

木造住宅倒壊シミュレーションには、Wallstat のソフトウェアを用いて行った。このソフトウェアは、木造軸組構法住宅の建物全体の大地震時の損傷状況や倒壊過程をシミュレーションできる数値解析プログラムである。実験装置のパラメータに基づいて作成した構造モデルに、実験結果から得られた変位を x 方向の振動として強制的に入力したときでシミュレーションをした。結果、制御している場合は、98.4 [mm] の変形になり、粘性減衰係数が小さい場合は倒壊した。この結果では、層間変形角が安全基準を少し上回ったものの、提案システムで減衰力を制御することで建物の倒壊を防ぐことが確認できた。また、耐震補強工事で使用されている片掛筋交の場合で同様のシミュレーションを行った。結果は、共振周波数付近で倒壊する結果となった。したがって、本論文で提案した制御システムを利用することによって、脆弱な建物は地震発生後に傾きつつも倒壊しないので、その住人は逃げ出すことが可能であると思われる。

参考文献

- (1) 坂田弘安：小規模木質制振構造の力学的挙動の解明と設計法に関する研究，
https://www.ajj.or.jp/jpn/design/2015/data/2_1award_sakata.pdf(2015)
- (2) 脇田英治，脇田健裕：サイズが異なる構造物間における減衰特性の評価法および適用性，日本建築学会
構造系論文集，Vol.74，No.644，1731/1739(2009)
- (3) 中川貴文：大地震動時における木造軸組構法住宅の倒壊解析手法の開発，建築研究資料，Vol.128，2010
- (4) 瀧野敦夫，上松千陽，中川貴文：倒壊解析シミュレーションに基づく木造住宅の地震被害度の推定，日
本地震工学会論文集，Vol.19，No.5，pp.368-377，2019

6 章 結論

本研究は、「脆弱な木造住宅の長屋に取り付けることができ、安価で小型な直線動作型セミアクティブ制震デバイスを開発すること」を目的とし、この研究目的を達成するために3つの課題を立てた。

- (1) 脆弱な木造住宅に取り付けるための制震デバイスを設計する。
- (2) 粘性減衰係数と Duty 比との関係を明らかにし、電子制御可能な制震デバイスを設計する。
- (3) 木造住宅に与えられる地震動を収束させる制御系を設計する。

(1) の課題は、第2章の中で記述した。本研究は直線動作型発電装置を制震デバイスとして利用するため、有限要素法解析ソフト ANSYS を用いて、単純構造で小型の制震デバイスを設計・開発した。直線動作型発電装置は、磁石とコイルで構成され、磁石が往復運動すると磁束が変化し、コイルに誘導起電力が発生するものである。この起電力が働くと減衰力が働き、起電力の大きさが減衰力の大きさが決定される。ここでは、大きな起電力が発生したパラメータについて明らかにした。

(2) の課題は、第2章の中で記述した。(1) で開発した制震デバイスの粘性減衰係数は、2つの FET で構成された双方向スイッチ回路に PWM 信号で駆動させると電子制御することができる。この PWM 信号の Duty 比で制御することで、粘性減衰係数は $120[\text{Ns/m}]$ から $230[\text{Ns/m}]$ の範囲で変化することを確認した。

(3) の課題は、第3章から第5章の中で記述した。制御対象とする木造住宅は2自由度系のモデルで設計した。制御系の設計は、建物の制震システムにも使われているスライディングモード制御理論に基づいて制御系を設計した。設計した制御系は、シミュレーションを用いて変位の大きさを計算した。シミュレーションの結果、制御している場合は制御していない場合と比べて変位の大きさが小さくなることを確認した。制御系の性能を確認するため、実機の模擬壁を試作し、制御している場合の変位を測定した。測定の条件は、ランダム振動 ($1.2[\text{Hz}]$ から $3.2[\text{Hz}]$ の範囲) で加振したときで行った。結果、最大変位は $60[\text{mm}]$ となり、振幅を抑えられることが確認できた。また、この結果から、制御時の層間変形角を求めると $0.029[\text{rad}]$ であり、層間変形角の制限値が $0.033[\text{rad}]$ 以下となることが確認できた。さらに制御性能の確認をするため、木造住宅倒壊ソフトを使用し、制御している場合の建物全体

の変形量を確認した。結果、制御している場合は、98.4 [mm] の変形になった。この結果では、層間変形角が安全基準を少し上回ったものの、提案システムで減衰力を制御することで建物の倒壊を防ぐことが確認できた。

本論文の 3 つの課題を通し、提案するセミアクティブ型の制震デバイスを用いて脆弱な木造住宅の振動を軽減させるための制御システムを実現できた。したがって、提案したシステムは脆弱な木造住宅の振動の抑制に役立つ防災システムとして貢献できると考えられる。

本研究では、一方向にのみ揺れが加わる現象を考えていたが、二次元的な振動が加わる場合についても検討する予定である。ここでは、木枠のバランスをとるために、2 本設置した制震デバイスのうち 1 本のみで制御を行ったが、実際の地震では、木枠にねじれが生じるはずであり、これを防ぐためには制震デバイスを 2 本以上同時に協調制御する必要があり、今後の課題である。

付録

耐震関連の主なできごと

年	主要地震	
1880	横浜地震	日本地震学会設立
1891	濃尾地震	
1906	サンフランシスコ地震	
1908	イタリア・メッシーナ地震	
1915		イタリアの耐震規定 (層せん断力係数)
1916		水平震度の提案
1923	関東大震災	
1924		設計用水平震度の導入
1925		地震研究所設立
1933	三陸沖地震	D 値法の提案
1940	インペリアルバレー地震	エンセントロ波の記録
1950		建築基準法制定
1963		建築物の高さの制限の撤廃
1964	新潟地震	
1968	十勝沖地震	
1971		RC 造柱の帯筋量強化
1977		新耐震設計法 (案) RC 造の耐震診断法
1978	宮城県沖地震	
1981		新耐震設計法の施行
1985	メキシコ地震	
1995	阪神淡路大震災	建築基準法改定 耐震改修促進法の制定・施行
1999	トルコ・コジャエリ地震, 台湾集集地震	

2000		限界耐力計算の導入 住宅性能表示制度の創立
2004	スマトラ沖地震	
2007	能登半島地震	建築基準法改正 (適合性判定制度の導入)
2008	中国・四川地震	
2010	ハイチ地震, チリ地震	
2011	東日本大震災	津波告示
2012		天井告示
2015	ネパール・ゴルカ地震	
2016	熊本地震	
2018	大阪府北部地震	
2021	福島県沖地震	

謝辞

本論文は、福岡工業大学大学院工学研究科物質生産システム工学専攻高原研究室に在籍して行った研究の成果を記したものである。

電気工学科高原健爾教授には、2022年3月に退職されるまで、指導教官として常に進むべき方向を示して戴きました。福岡工業大学電気工学科の就職支援担当等で多忙を極めている中で、研究の進捗だけでなく体調の状態も気にかけて戴きました。一時期体調不良で研究活動ができなくなった際にも様々な支援をして戴き、今日まで頑張れたのは高原先生のご尽力があつてのことと思います。私にとって高原先生は、研究者として教育者として志していきたい目標とする人物です。10年間本当にありがとうございました。

電子情報工学科江口啓教授には、高原教授が退職されたあとに、急遽、指導教官及び主査になって戴きました。論文の指導や審査の計画等、博士号を取るために多くのご尽力を戴きました。厚く御礼申し上げます。

高原研究室の在籍期間中に会った全ての先輩、同輩、後輩には、多くの温かい励ましと助けを戴きました。研究室の日々を楽しく送ることができたことに感謝申し上げます。

茨城職業能力開発促進センターの上司、同僚には、博士号を取るにあたり、業務の分担や構造物に関する専門的知識の助言等をして戴きました。ここに深く感謝いたします。

最後に、常に私の体調を心配しながら応援し続けてくれた祖父母、母、弟妹に心から感謝いたします。

研究業績

1. 査読付き学術論文：第一著者 3件

- (1) Takahito Adachi and Kenji Takahara, Analysis and measurement of damping characteristic of linear generator, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 52, No.3-4, pp. 1503–1510, 2016.
- (2) Takahito Adachi and Kenji Takahara, Structural design of a linear-motion type semi-active damper by finite element method, International Journal of Natural Sciences Research, Vol.4, No.6, pp. 107-111, 2016.
- (3) Takahito Adachi and Kenji Takahara, Design of a Gentle Damping System for a Weak Wooden House, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Vol.7, No.8, pp. 20-24, 2018. (February)

2. 査読付き学術論文 1件

- (1) H. Nishiuchi, K. Takahara, K. Maekawa, T. Adachi, T. Kajiwara, Generate Hydrogen using Activated Aluminum Particles and Water, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Vol.7, No.8, pp. 15-19, 2018.

3. 国際会議 3件

- (1) (口頭発表, 査読なし)
○Takahito Adachi and Kenji Takahara, Structural design of a linear-motion type semi-active damper by finite element method, Abstract of Applied Sciences and Engineering, Vol.14, pp.17, 2016
- (2) (ポスター発表, 査読なし)
○Takahito Adachi and Kenji Takahara, Design of a Gentle Damping System for a Weak Wooden House, Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science, pp. 208-214, 2018

(3) (ポスター発表, 査読なし)

○Takahito Adachi and Kenji Takahara, Design of a power-saving vibration control system for a fragile wooden house by a sliding mode control method, The 6th Annual Conference on Engineering and Information Technology, pp. 526-536, 2019

4. 研究会・紀要 0件

5. 全国大会・支部大会 2件

(1) (口頭発表, 査読無し)

○足立孝仁, 高原健爾 (福岡工業大学): リニアジェネレータを用いた粘性減衰力の可変システムの基礎特性, 産業応用工学会全国大会 2016 講演論文集, pp.42-43, 2016

(2) (口頭発表, 査読無し)

○足立孝仁, 高原健爾 (福岡工業大学): 木造住宅に適応する粘性減衰可変型制震システムの設計, 2021 年度 (第 74 回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会, pp.176-177, 2021

6. 特許・出願 0件

なし

7. 著書 0件

なし

8. その他の活動 (RA, 専攻分野に関わる諸活動等) 0件