

平成21年4月1日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560591

研究課題名（和文） 力学エネルギー遅延機構による制震ダンパーの開発

研究課題名（英文） A novel seismic control device with kinetic energy delay system

研究代表者

金澤 健司（KANAZAWA KENJI）

（財）電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員

研究者番号：00371435

研究成果の概要：

制震構造は地震等による建物の変形を低減する技術であり、従来技術では建物の振動エネルギーを制震装置に吸収し、リアルタイムで熱などに変換して無害化している。本研究では、この吸収と変換の過程に時間差を設けることで小型で高効率の制震装置が実現できる可能性に着目して、制震装置に設けた慣性円盤に振動エネルギーを蓄積し時間差をおいて放出することで建物の変形を低減させる新しい仕組みを提案し、その基本原理を模型実験によって検証した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：構造制御，制震構造，ダンパー，減衰，振動実験，回転エネルギー，自由振動

## 1. 研究開始当初の背景

1994年ノースリッジ地震や1995年阪神・淡路大震災の発生以降、建築物の耐震性への要求性能として、倒壊を防止し人命を保護するだけでなく、機能維持や修復性などの建物を継続して使用するための構造性能の確保が社会一般のニーズとして強いことが明らかとなった。これを実現する有力な構法のひとつに制震構造（制振構造）がある。制震構造は、地震による揺れのエネルギーを制震ダンパーに吸収させることで建物の変形量を抑制し、その主要構造や付帯設備の損傷を抑

制するものである。国内では、阪神・淡路大震災を契機として制震構造を実現する制震ダンパーの開発が急速に進み、現在では鋼材ダンパーや粘性ダンパー、粘弾性ダンパー、摩擦ダンパーなどの制震ダンパーが実用されている。これらの制震ダンパーは、建物層間の振動エネルギーを鋼材の破壊エネルギーや粘性体の発熱エネルギーに変換して建物層間の振動を抑制する。しかし、近い将来に発生が予想される東海・東南海地震などの海溝型巨大地震では、都市直下の厚い堆積地盤上で数秒から10秒に卓越周期を持つ長周

期地震動による揺れが 10 分近く続く可能性  
があることが指摘されており、このように継  
続時間の長い地震が発生したときには、制震  
ダンパーが長時間にわたり連続して稼動す  
ることになるため、制震ダンパーのエネル  
ギー吸収容量を超える振動エネルギーが発  
生し、制震効果が発揮されない恐れもある。  
この問題点を解決するため、制震ダンパー  
の長時間にわたる稼動状態を正確に予測す  
るための実験的・解析的研究が進められて  
いる。これらの研究が進展することで、制  
震ダンパーの容量を適切に定められるよう  
になるものと期待されるものの、結果とし  
て制震ダンパーの重量や大きさ等が増大  
する恐れがある。

## 2. 研究の目的

報告者は、制震構造に『力学エネルギー  
遅延機構』という新しいアイデアを盛り込  
むことで、長時間の稼動状態にも耐える  
コンパクトな制震ダンパーを実現できる  
可能性を見出した。現状の制震ダンパー  
は、建物の振動エネルギーを制震ダンパー  
内部に吸収し、リアルタイムで熱エネル  
ギーや破壊エネルギーに変換・消失させて  
いると考えることができる。これに対し  
て、本研究で提案する『力学エネルギー  
遅延機構』による制震ダンパー（以下、  
遅延ダンパーと略す）は、建物の振動  
エネルギーを制震ダンパー内部に運動  
エネルギーとして一時的に吸収・蓄積し、  
その蓄積した運動エネルギーを時間差を  
おいて放出し、建物の揺れを止めるため  
に再利用するものである。

本研究では、模型実験や数値シミュレ  
ーションを通して、遅延ダンパー基本  
的な原理が成立することを実証すること  
を研究の目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究で提案する遅延ダンパーの実証  
するため、下記の項目(1)~(4)を実施  
した。

### (1)遅延ダンパーの動作原理の構築と試作 模型の設計・製作

本研究で提案する遅延ダンパーの動作  
原理を整理し、それを構成する要素を  
整理するとともに、遅延ダンパーの  
基本原理を確認するための試作模型を  
設計した。

### (2)単純模型の振動試験による遅延ダン パーの基本原理解説

遅延ダンパーによって建物の制震効果  
が得られることを確認するため、遅延  
ダンパーの最小構成要素である慣性  
円盤とストッパーとそれらの支持部材  
のみによる遅延ダンパー模型の振動  
試験を実施した。振動試験は、建物  
を想定した 1 質点系の重錘振り子  
に遅延ダンパー模型の自由振動試験  
を実施し、重錘振り子の変位の減衰  
波形に基づいて、遅延ダンパーの  
制震効果や遅延ダンパーを付加  
した重錘振り子の減衰波形の特徴  
などの基本原理について分析した。

### (3)回転増幅機構付き遅延ダンパーの 振動試験による制震効果の分析

本研究で提案する遅延ダンパーは、  
多段式ギアによる回転増幅器機構を  
付与することで、制震性能を維持  
したまま小型化を図ることができる  
ものと期待される。このことを確  
認するため、項目(2)の遅延ダン  
パー模型に多段式ギアによる回転  
増幅機構を組み込んだ上で重錘  
振り子の自由振動試験を実施し、  
回転増幅機構付きの遅延ダンパー  
の制震効果を分析した。

### (4)力学モデルの構築と数値シミュ レーションによるパラメータスタ ディ

回転増幅機構を付加した遅延ダン  
パーの力学モデルを理論的に構築  
し、数値シミュレーションを実施  
した。数値シミュレーションでは、  
遅延ダンパーの動的挙動を支配  
するストッパー長さ、回転増幅機  
構の速度伝達比、ストッパーとそ  
れに衝突する第一ギアの間反発  
係数の 3 種類をパラメータとし  
た解析を実施し、実験結果との  
比較を通してモデルの妥当性を  
検討した。

## 4. 研究成果

### (1)遅延ダンパーの動作原理の構築 と試作模型の設計・製作

#### ①力学エネルギー遅延機構の動作 原理

本研究で提案する遅延ダンパーは、  
建物の振動エネルギーをダンパー  
内部に運動エネルギーとして一時  
的に蓄積し、その蓄積した運動  
エネルギーを時間差をおいて放  
出し、建物の揺れを抑制するた  
めに再利用するものである。その  
原理を、図 1 に示す 1 質点系モ  
デルで説明する。制震ダンパー  
は、ストッパーと円盤から構成  
され、ストッパーは建物屋根に、  
円盤は床に剛結されている。図  
1-(a) は屋根が静止状態から右  
向きの水平外力を受けた瞬間で  
あり、屋根及びストッパーが右  
へ変位するとともに、円盤は右  
回りに滑らず回転する。屋根が  
右へと大きく移動すると、円盤  
とストッパーが離れ右回りに円  
盤が空回りする(図 1-(b))。こ  
の時、外力から与えられた力学  
エネルギーは、建物の力学エネ  
ルギーと円盤の回転エネルギー  
に分配されるので、建物の最大  
変位は円盤がない場合よりも小  
さく抑えることができる(効果 1)。  
建物

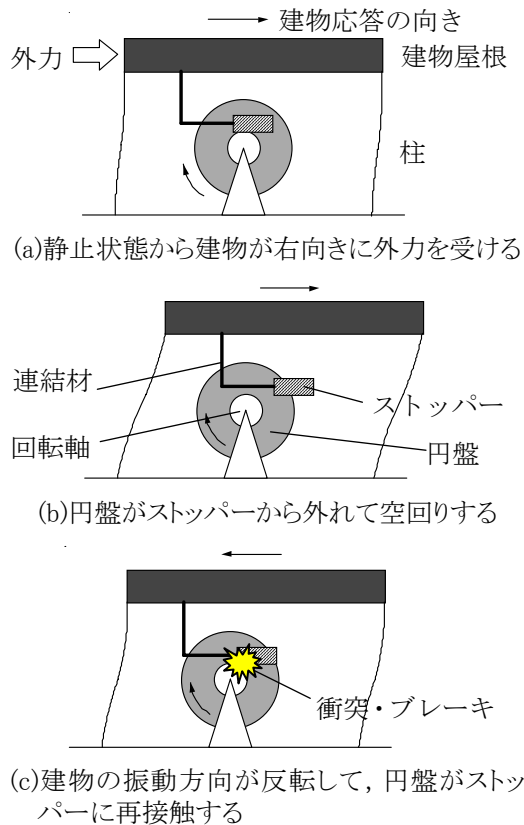


図1 遅延ダンパーの動作原理

が最大変形を迎えた後、振動方向を左に変え、円盤とストッパーが再接触する(図1-(c))。この時、円盤の回転運動は屋根を右向きに押す方向に作用し、ブレーキとなる(効果2)。この二つの効果によって建物の振動エネルギーを減衰させることができる。

オイルダンパーや鋼材ダンパなどの従来の制震ダンパーは、建物の層間変形によって発生した相対速度を熱エネルギーや金属の破壊エネルギーにリアルタイムで変換し、建物の振動エネルギーを消失させる仕組みになっている。このように従来の制震ダンパーでは、建物の振動エネルギーの吸収から消失までのプロセスをリアルタイムで処理しているため、エネルギーの吸収性能を高めようとするとダンパーの重量や大きさ、コストも増大する。本研究で提案する制震ダンパーは、振動エネルギーの吸収を層間変形速度が最大となる時点、すなわち、建物の運動エネルギーが最大となる時点のみで吸収し(効果1)、そこで吸収したエネルギーを層間変形速度が反転した際にブレーキとして使用し、そのときの衝突エネルギーによって運動エネルギーを消失させる構造(効果2)であり、効率的に建物のエネルギー消費を行うことができる。特に、力学エネルギーを蓄積して消費するまでに遅延時間を設けることで効率的にエネルギー消費をする考え方に獨創性があると考えられる。また、建物の層間変位

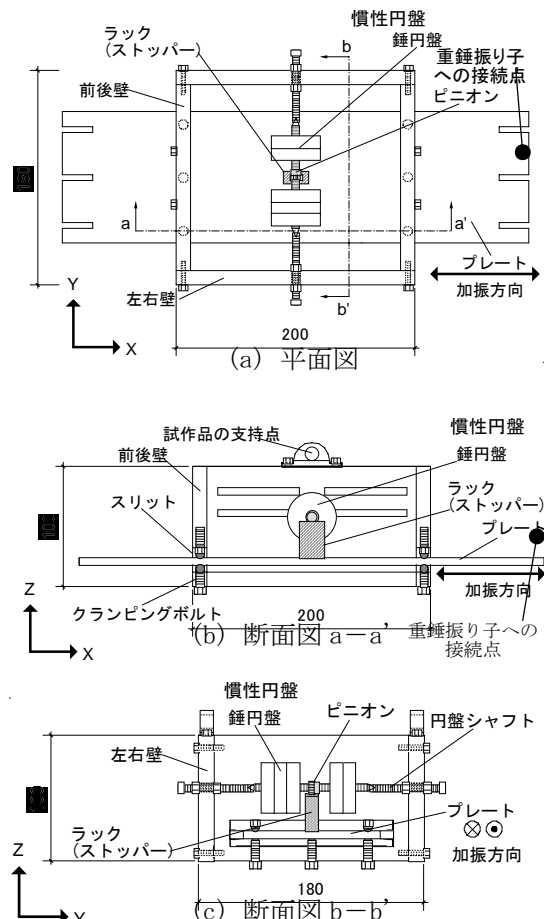


図3 遅延ダンパー模型の設計図面

と円盤の回転角のギア比を調整することで、円盤の大きさを小さくすることが可能であり、制震ダンパーの小型化および軽量化を図ることができる利点もある。

## ②試作模型の設計・製作

「力学エネルギー遅延機構」の原理を検証するための模型の設計・製作を行った。図2にダンパー模型の平面図、断面図 a-a'、断面図 b-b'を示す。ダンパー模型はアクリル箱の内部に、慣性円盤、ラック、円盤シャフト、プレートで主に構成される。ここで、図1の概念図と図2のダンパー模型は、「円盤」と「慣性円盤」、「ストッパー」と「ラック」、「回転軸」と「ピニオン」、「連結材」と「プレート」がそれぞれ対応する部材である。

模型の動作は、ラックを貼り付けたプレートが、アクリル箱を加振方向に水平貫通移動することで行われる。このプレートの水平貫通移動により、慣性円盤を回転させ、図1の一般モデルで示した制震効果を発揮させる。このとき、プレートを低摩擦で水平移動させるため、クランピングボルト(ボルトの先端に金属球がはめ込まれたもの)を用いて、プレートの移動を拘束した。また、図1の概念図では、ストッパーと円盤が直に接触し、そ

の摩擦力で円盤を回転させる仕組みとなっているが、ダンパー模型ではラックとピニオンの噛み合わせによるラック・ピニオン機構により、確実に慣性円盤を回転させることができる仕組みとした。

## (2) 単純模型の振動試験による遅延ダンパーの基本原理の実証

### ① 基本原理を確認するための実験システム

遅延ダンパーを付加した振動系の基本的な振動性状を調べるため、図3に示すように、重錘振り子に最小構成要素の遅延ダンパー模型を設置して重錘振り子の自由振動波形を測定した。重錘振り子は、重量 40kg、固有周期 1 秒とした。計測項目は、重錘振り子の重心での水平変位、加速度円周接線成分および法線成分と、不動点を確認するための重錘振り子の支持架台の加速度水平成分、遅延ダンパー模型内部の慣性円盤の回転速度、遅延ダンパー模型と重錘振り子間の作用力の 6 項目である。

試験条件は、自由振動の初期変位を-30mmに設定した上で、遅延ダンパー模型内部の慣性円盤の個数を 1 個、3 個および 5 個の 3 種類、ストッパー長さを 80mm と 20mm の 2 種類とした合計 6 種類の模型の試験を実施した。自由振動の初期変位を-30mm と設定したので、ストッパー長さ 80mm の場合は慣性円盤とストッパーが常に接しているため遅延機構は無効となり、ストッパー長さ 20mm の場合は重錘振り子の水平変位が ±10mm を超える範囲では遅延機構が有効となる。

### ② 実験結果

図4に自由振動試験による重錘振り子の変位波形を示す、同図では、慣性円盤の個数で分類して遅延機構が有効な場合を赤太線で、無効な場合を青細線で示した。図4によれば、慣性円盤の個数に依らず、遅延機構が有効な場合には無効な場合よりも、自由振動の変位波形が速やかに収束している。また、遅延機構が有効な場合について、変位がストッパー長さ以下 (±10mm 以下) に収束するまでの時間を読み取ると、慣性円盤が 1 個では 15 秒、5 個では 5 秒であり、慣性円盤の個数が多いほど遅延ダンパーの重錘振り子に対する変位抑制効果が高くなっている。

この慣性円盤の個数と変位抑制効果の関係を詳細に調べるため、自由振動開始から 3 秒までの時間に着目して、初期変位時を 100% とした重錘振り子の力学エネルギー (運動エネルギーと位置エネルギーの和) の割合の時間推移を図 5-(b) に示す。参考として、図 5-(a) には、重錘振り子の水平変位を示す。

図 5 によれば、重錘振り子の変位が 1.0cm もしくは -1.0cm を通過して、遅延ダンパー内部のストッパーと慣性円盤が衝突するたび

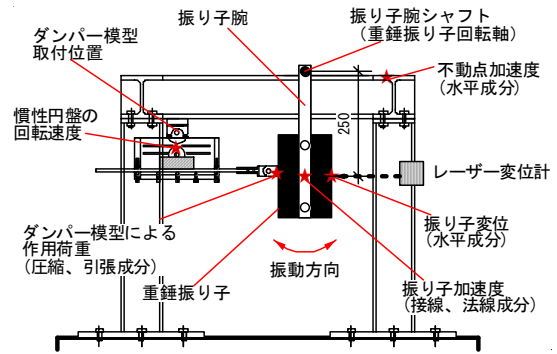
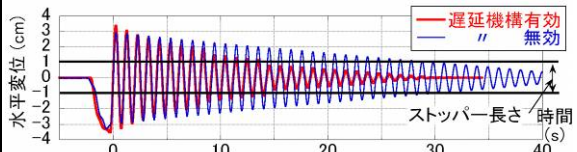
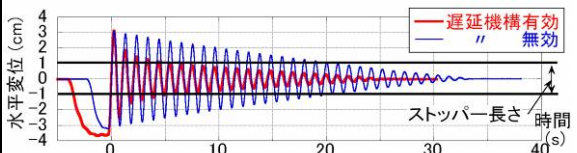


図3 遅延ダンパー模型の測定系

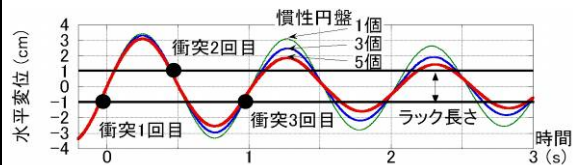


(a) 慣性円盤 1 個の場合 (付加質量比 1/400)

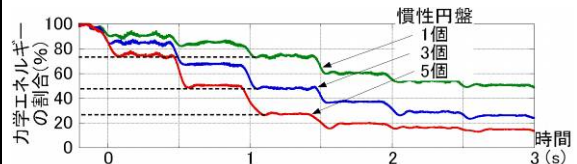


(b) 慣性円盤 5 個の場合 (付加質量比 1/80)

図4 遅延ダンパーの単純模型を付加した重錘振り子の変位波形



(a) 重錘振り子の変位



(b) 重錘振り子の総力学エネルギーの割合

図5 遅延ダンパーの単純模型を付加した重錘振り子の変位と力学エネルギーの関係

に、力学エネルギーがステップ状に低下していくことが確認できる。また、慣性円盤の個数が多いほど、衝突に伴う力学エネルギーの減少量が大きいことも確認できる。例えば、3 回目の衝突までの力学エネルギーの減少率を読み取ると、慣性円盤が 1 個では-27%、3 個では-52%、5 個では-74%であり、慣性円盤の個数と力学エネルギーの減少率の間には、線形の関係が認められる。さらに、衝突 1 回目と 2 回目の力学エネルギーの減少量を比較すると、衝突 2 回目の方が力学エネルギーの減少量が大きくなっている。これは、衝突 1



回目は静止している慣性円盤とストッパーが衝突するのに対し、衝突2回目では逆回転している慣性円盤とストッパーが衝突し、衝撃力が2回目の方が大きいのである。

### ③考察

以上の実験結果は、遅延ダンパー内部の慣性円盤とストッパーが衝突することで対象振動系の質点の変位を抑制できること、慣性円盤の個数を増やして見かけの付加質量効果を增强するほど変位の抑制効果が大きくなることを示しており、報告者が考察した力学エネルギー遅延機構とその基本的な動作原理が実現可能であることを示している。

### (3)回転増幅機構付き遅延ダンパーの振動試験による制震効果の分析

#### ①回転増幅機構の効果を確認するための実験システム

本研究で提案する遅延ダンパーは、多段式ギアを組み込むことで制震性能を保持したまま、小型化を図ることができることにも利点がある。このことを確認するため、研究成果(2)の①で述べた実験システムにおいて、遅延ダンパー模型の内部に二段ギアを組み込み、同じく自由振動試験を実施した。図6に回転増幅機構付き遅延ダンパー模型の断面図を示す。ストッパー長さは、遅延機構有効な場合として2mmと10mm、無効な場合として80mmの3種類を設定した。ギア1とギア2は歯数10と50に、慣性円盤は100g、直径40mmのもの1個にそれぞれ固定した上で、ギア3を歯数10から50の範囲で15種類に変化させた。このように、ギア3の歯数を変えることで、遅延ダンパー模型の重錘振り子に対する付加質量比をパラメータとした試験を実施した。

#### ②実験結果

自由振動試験に基づき、1回目の衝突による重錘振り子の力学エネルギーの減少量を等価にする意味での減衰比を推定した。それらの減衰推定値と付加質量比の関係を図7-(a)に示す。遅延機構が有効な場合には、ギア3を変えて付加質量比を増加させるほど、減衰比がリニアに大きくなる傾向が得られた。また、ストッパー長さを2mmと極端に短くしたケース(S2)は、十分な長さを確保した10mmのケース(S10)と比較して、減衰比が小さくなり、変位抑制効果が落ちている。S2のケースでは、ストッパーとギア1の間に滑りが確認されており、衝突による力の伝達が不十分であったものと推察される。

図7-(b)には、同じく実験で得られた最大加速度と付加質量比の関係を示す。遅延機構を有効とした場合には無効とした場合よりも、最大加速度が大きくなっている。

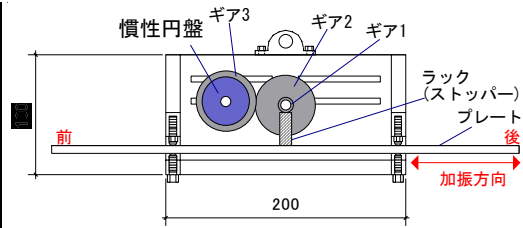
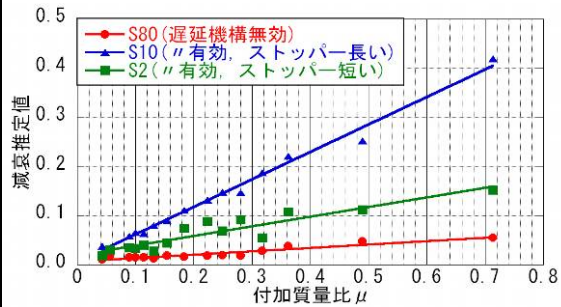
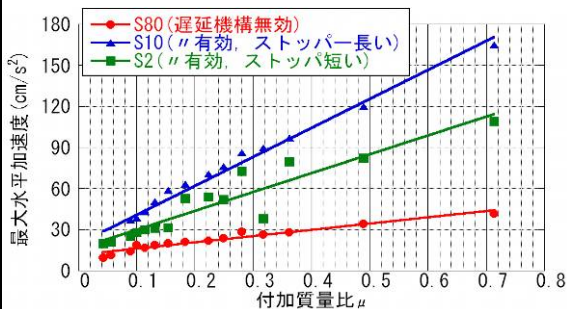


図6 増幅機構付き遅延ダンパー模型



(a)減衰比と付加質量比の関係



(b)最大加速度と付加質量比の関係

図7 増幅機構付き遅延ダンパーの試験結果

### ③考察

以上の実験結果によって、回転増幅機構を加えることで振動系の変位抑制効果が增强できることが確認された。このことは、回転増幅機構を加えることで、制震性能を保持しながら遅延ダンパーの小型化や軽量化を図ることが可能であることを示している。その一方で、回転増幅機構を付加して付加質量効果を增加させると、最大加速度が大きくなることも明らかとなった。

### (4)力学モデルの構築と数値シミュレーションによるパラメータスタディ

Eular-Lagrange法と角運動量保存則によって、力学エネルギー遅延機構のモデル化を行い、数値計算を実施した。制震効果を考察する上で重要なストッパーと慣性円盤の衝突は、反発係数  $e$  による衝突前後の速度変化を考慮したモデルとした。図8に、模型実験の再現シミュレーションを実施した結果の一例を示す。シミュレーションの結果は、遅

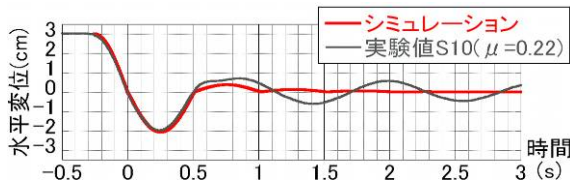


図8 実験結果の数値シミュレーションの例

延機構が有効となる0.5秒までの範囲において、実験値と一致しており、本研究で構築したモデルの妥当性を検証することができた。

#### (5) 本研究の意義と今後の展望

模型実験と数値シミュレーションを通して、報告者らが提案する『力学エネルギー遅延機構』による制震ダンパーの実現可能性や有効性を示した。本技術は、制震効果の中でも、振動系の変位抑制効果に優れること、その代償として高周波の最大加速度が発生することが明らかとなった。本研究は動作原理や動的性状の基本的な部分を解明するまでに留まっているが、実用化を見通す成果が得られており、ここでの知見を応用して実大プロトタイプモデルの製作につなげたい。

また、『力学エネルギー遅延機構』のオリジナリティである制震ダンパーのエネルギー吸収と消失の過程に時間差をおくというアイデアについては、本研究で試した動作原理以外にも、例えば、吸収した回転エネルギーを再利用せずに緩やかに消失させるなどの、他のバリエーションに派生させることも可能であり、この点についても検討を進める余地がある。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- ① 熊王皓一, 金澤健司, 北村春幸, 力学エネルギー遅延機構による制震ダンパーの模型実験, その3 パラメータスタディによる検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造 II, 印刷中, 平成21年(2009), 査読無し
- ② 金澤健司, 熊王皓一, 北村春幸, 力学エネルギー遅延機構による制震ダンパーの模型実験, その4 増幅機構付き制震ダンパーによる自由振動試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造 II, 印刷中, 平成21年(2009), 査読無し
- ③ 熊王皓一, 金澤健司, 須永泰浩, 北村春幸, 力学エネルギー遅延機構による制震ダンパーの模型実験, その3 数値シミュレーションによる制震ダンパーの自由振動試験, 日本建築学会関東支部第79回研究報告 CD-ROM, 論文番号 2075(4 ページ), 平成21年(2009), 査読無し

- ④ 須永泰浩, 金澤健司, 熊王皓一, 北村春幸, 力学エネルギー遅延機構による制震ダンパーの模型実験, その4 増幅機構付き制震ダンパーの自由振動試験, 日本建築学会関東支部第79回研究報告 CD-ROM, 論文番号 2076(4 ページ), 平成21年(2009), 査読無し
- ⑤ 金澤健司, 熊王皓一, 北村春幸, 力学エネルギー遅延機構による制震ダンパーの模型実験, その1 動作原理と縮小模型の設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造 II, 635-636, 平成20年(2008), 査読無し
- ⑥ 熊王皓一, 金澤健司, 北村春幸, 力学エネルギー遅延機構による制震ダンパーの模型実験, その2 自由振動試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造 II, 637-638, 平成20年(2008), 査読無し
- ⑦ 熊王皓一, 金澤健司, 明間祐作, 北村春幸, 力学エネルギー遅延機構による制震ダンパーの模型実験, その1 試作品の設計, 日本建築学会関東支部第78回研究報告 I, 157-160, 平成20年(2008), 査読無し
- ⑧ 明間祐作, 金澤健司, 熊王皓一, 北村春幸, 力学エネルギー遅延機構による制震ダンパーの模型実験, その2 制震ダンパーの自由振動試験, 日本建築学会関東支部第78回研究報告 I, 161-164, 平成20年(2008), 査読無し

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 制震方法並びに装置

発明者: 金澤健司

権利者: (財) 電力中央研究所

種類: 特許

番号: 特許公開 2008-115598

出願年月日: 2006年11月2日?

国内外の別: 国内

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

金澤 健司 (KANAZAWA KENJI)

(財) 電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員

研究者番号: 00371435

(2) 研究分担者

北村 春幸 (KITAMURA HARUYUKI) (2007)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号: 20339112

(3) 連携研究者

北村 春幸 (KITAMURA HARUYUKI) (2008)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号: 20339112