

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	2074 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波置換法の実験的検討(構造)
Title	
著者(和文)	田上 高行, 佐藤 大樹, 所健, 北村春幸, 笠井和彦
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, KAZUHIKO KASAI
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集 I, , No. 79,
Citation(English)	, , No. 79,
発行日 / Pub. date	2009, 2
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453927

長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波置換法の実験的検討

準会員 ○田上高行*1 正会員 佐藤大樹*2 同 所 健*3
同 北村春幸*4 同 笠井和彦*5

構造 振動

風応答 ランダム波加振 正弦波加振 実験

温度上昇 粘弾性ダンパー

1. はじめに

一般に、粘弾性ダンパーは温度依存性を有し、振動時に吸収した振動エネルギーを熱へと変換するため温度が上昇する性質を持ち、長時間の振動に対して周囲への熱伝導・熱伝達などにより、熱が外に発散する。そのため、風応答の制振に用いる場合には、継続時間を考慮する必要がある。しかし、粘弾性ダンパーの長時間の正弦波振動時に検討はいくつか行われているが¹⁾、長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性については不明な点も多い。

長時間の正弦波加振実験の結果から、エネルギー吸収により粘弾性ダンパーの温度は上昇するが、発熱量の減少と熱伝導・伝達の効果により、ある時点で温度が定常状態になるため、長時間振動時においても粘弾性ダンパーの剛性が低下し続けることはなく、一定値となることが確認されている¹⁾。また、佐藤らにより実際の風応答時のようなランダム波を入力した場合でも、長時間の正弦波を入力した場合と同様に粘弾性ダンパーの温度が定常状態になることが解析により確認されており、その特性を利用し、ランダム波と等価な正弦波に置換する正弦波置換法が提案されている²⁾。

本報では、実験により長時間のランダム振動に対する粘弾性ダンパーの特性を確認し、正弦波置換法の精度を検証する。

2. 解析手法と実験概要

2.1 長時応答解析法

解析には、既往研究による長時応答解析法を用いる¹⁾。長時応答解析法は、粘弾性体部分での発熱は履歴の面積から求め、さらに熱伝導・熱伝達を考慮した時刻歴解析手法である。正弦波加振による実験と解析結果の比較から、精度良く解析を行えることが分かっている。解析に用いるパラメータは $\alpha = 0.558$, $G = 3.92 \text{ N/cm}^2$, $a_{\text{ref}} = 0.000056$, $b_{\text{ref}} = 2.1$, $p_1 = 14.06$, $p_2 = 97.32$, $\theta_{\text{ref}} = 20^\circ\text{C}$, sp (鋼板) = $364 \text{ N/cm}^2/^\circ\text{C}$, sp (粘弾性体) = $187 \text{ N/cm}^2/^\circ\text{C}$, κ (粘弾性体) = $0.188 \text{ N/sec}/^\circ\text{C}$, κ (鋼板) = $43.13 \text{ N/sec}/^\circ\text{C}$ である¹⁾。

2.2 正弦波置換法

正弦波置換法²⁾は、ランダム波加振と等価なダンパー特性が得られる正弦波 (以下、置換正弦波) を決める方法である。置換正弦波 $u_d(t)$ は、置換振幅 A_r 、置換振動数 $\omega_r (=2\pi f)$ を変形の標準偏差 σ_D 、繰り返し数 N_0^+ (変形波形がゼロ軸を正の傾きで超える回数) および継続時間 T_a を用いて、次式よりそれぞれ求めることができる。

$$f_r = N_0^+ / T_a \quad (1)$$

$$A_r = \sqrt{2}\sigma_D \quad (2)$$

2.3 粘弾性ダンパーおよび計測概要

今回の実験に用いるダンパーの粘弾性体材料はアクリル系 (住友3M製 ISD111) とし、せん断面積 $A_s = 256 \text{ cm}^2$ 、厚さ $d = 1.6 \text{ cm}$ である。

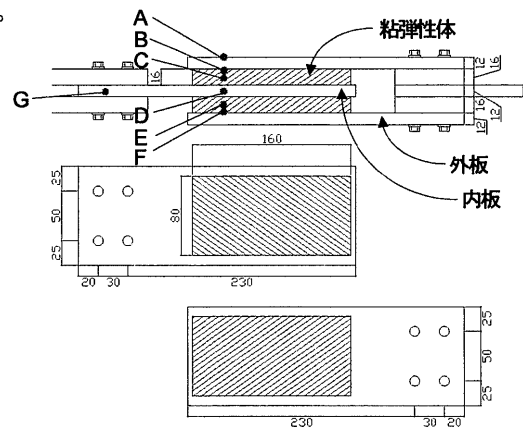


図1 試験体詳細 (単位: mm)

図1に示すように、粘弾性体の温度は、外板の外気側 (A点)、粘弾性体上側の厚さ方向 1/4 (B, F点) と 1/2 (C, E点) の位置、そして中板厚さの中心 (D点) の計測を行う。また、治具 (G点)、外気 (H点) も測定する。温度の測定には熱電対を用いた。ダンパーの荷重と変位を測定する。時間刻みは温度を $\Delta t = 1.0 \text{ sec}$ で加振開始から終了まで測定し、変位、荷重を $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ で 200 秒ごとに 20 秒間測定する。外気温は加振終了までの間、常に一定の温度となるよう維持する。

3. 正弦波加振

3.1 加振計画

比較的高層の建物への適用を考慮して正弦変位を与える。表1に示す Case1_1, Case1_2 の正弦波を用いて $T_a = 3,000$ 秒まで加振を行い、ダンパーの温度変化を計測する。ダンパー初期温度は 20°C とする。

3,000 秒までの温度時刻歴の実験結果と解析による同定により熱伝達係数を決定する。また、熱伝達係数は加振最大速度に関係していると予測し、両者の関係性を考察する。

表1 入力正弦波の種類

Case	振動数 (Hz)	ひずみ (%)	最大速度 (cm/s)
1 1	0.25	50	1.256
1 2	0.5	50	2.512

3.2 実験結果

図2に実験により得られるA~D, H点の温度時刻歴を示し (E, F点はB, D点と同じ結果となったため省く)、図3に1サイクル, 100サイクル, 750サイクル目におけるダンパーの履歴を、図4に貯蔵剛性 K'_d , 損失剛性 K''_d , 損失係数 η_d を示す。

K'_d は履歴ループの傾きを最小2乗法によって求める。

$$K'_d = \frac{n \sum u_{d,i} F_{d,i} - \sum u_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum u_{d,i}^2 - (\sum u_{d,i})^2} \quad (3)$$

ここで、 Σ は総和記号で、履歴の n 個の $u_{d,i}, F_{d,i}$ を対象とする。また、 η_d は次式で表される。

$$\eta_d = E_D / (\pi K'_d u_{d,max}^2) \quad (4)$$

ここで E_D : 履歴ループの面積を表す。 K'_d は K'_d, η_d を用いて次式で表される。

$$K''_d = \eta_d K'_d \quad (5)$$

図2に (実線) と長時応答解析法による解析 (破線) より得られた温度時刻歴を示す。本研究で用いた粘弾性ダンパーで振動数が 0.25Hz, 0.50Hz における 3,000 秒の加振では温度が定常にならないことが分かる。文献1では 3,000 秒で温度が定常状態になったが、今回の実験に用いた粘弾性体は厚さ方向の温度分布を測定することを目的として厚さを 1.6 cm としたため、粘弾性体内部で発生した熱がこもり易く鋼板に熱伝導されにくいいため、温度が定常になるまでに 3,000 秒以上の時間がかかるものと考えられる。

図3に実験より得られたダンパー変位・荷重履歴を示す。加振開始直後は履歴の面積が小さくなり、粘弾性ダンパーのエネルギー吸収能力が下がっているが、時間経過につれ履歴の面積の減少率が小さくなる。粘弾性ダンパーは継続時間の長い正弦波加振においても安定したエネルギー吸収能力を発揮することが分かる。

図4に実験より得られた剛性の時間変化を示す。剛性からも、時間経過とともに剛性が 3,000 秒の加振で定常になりつつあることが見て取れる。正弦波加振実験では、加振時間が短いため剛性変化が一定になるところまでは確認できなかったが、加振時間を長くすることで剛性が定常になると予想できる。

実験値と一致するように解析の熱伝達係数を試行錯誤的に、Case1_1 での熱伝達係数は $\alpha_{c,out} = 0.21$ (N/sec/cm²/°C), $\alpha_{c,in} = 0.18$ (N/sec/cm²/°C)、Case2_1 では $\alpha_{c,out} = 0.26$ (N/sec/cm²/°C), $\alpha_{c,in} = 0.23$ (N/sec/cm²/°C) と決定して ($\alpha_{c,out}$ は外板、 $\alpha_{c,in}$ は内板の熱伝達係数を意味する)、Case によって熱伝達係数 α_c が異なり、速度と熱伝達係数に関連性があることが見受けられる。よって、熱伝達係数の決定には十分に注意し、粘弾性体の厚さや速度について考慮する必要がある。

3.3 解析との比較

図5に熱伝達係数 α_c と各 Case の最大速度の関係を示す。速度が大きければ α_c の値も大きくなっていることが分かる。今後は実験数を増やし速度と熱伝達係数の関係を把握することで、熱伝達係数が簡便に決定できるものと思われる。

上記の熱伝達係数を用いて解析を行った結果、今回使用する粘弾性ダンパーの場合、振動数が 0.25Hz では温度が一定になるまでに 10,000 秒程度かかることが分かった。正弦波加振実験での Case1_1 の振動数 0.25Hz は、実験で使用するランダム波を正弦波置換法により算出した置換振動数に近い振動数として採用したものであり、ランダム波においてもこれに近い時間で温度が定常になると予想される。

実験と解析の温度について各点を比較すると、A, C 点は同様の結果となったが、B と D 点はずれが生じている。ただ、剛性については解析と実験で値がほぼ一致していることから本解析は妥当であるといえる。

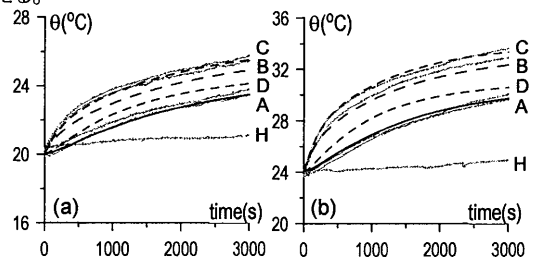


図2 正弦波による実験と解析の温度時刻歴の比較 (— Exp. - - Cal) (a):case1_1, (b):case1_2)

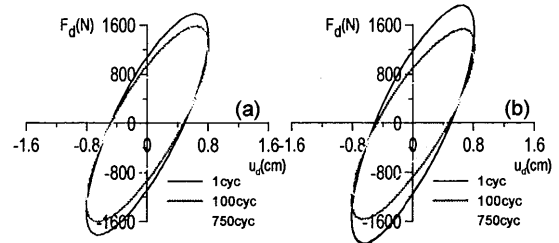


図3 正弦波による実験の履歴 ((a):case1_1, (b):case1_2)

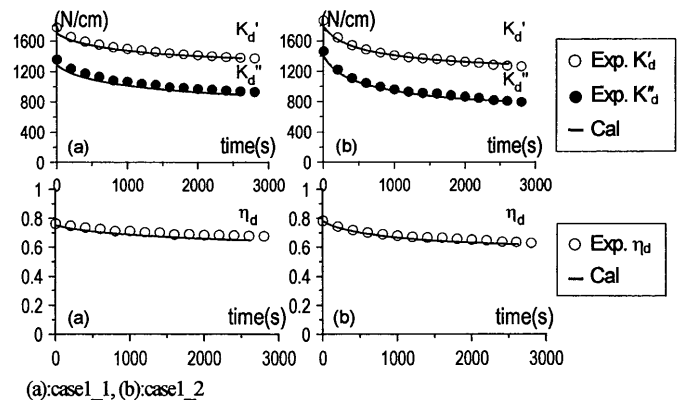


図4 正弦波による実験の剛性

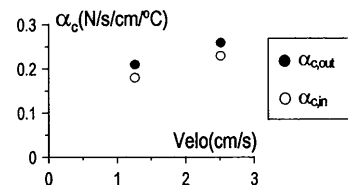


図5 加振速度と熱伝達係数

4. ランダム波加振実験

4.1 加振計画

ランダム波加振時のダンパー温度や剛性の変化を考察する。外気温の調節が容易なことから初期温度は24°Cとした。

表2に入力用ランダム波の実験名とパラメータを示す。A= 風方向, C= 風直角方向を意味する。

ランダム波の作成には高さ200m、幅・奥行きが等しく50mの建物を想定し、再現期間500年、粗度区分をIIIとしてパワースペクトル密度(PSD)をもとに、風方向および風直角方向の定常ランダム時刻歴波形をAR法により作成した。継続時間 T_a は風方向、風直角方向ともに12,000秒、解析時間刻みは $\Delta t=0.01$ 秒とした。

固有周期 $T_0=3$ 秒($f_0=0.33\text{Hz}$)について、それぞれ減衰定数を2%の1質点モデルを用いて風方向および風直角方向の風力時刻歴波形で時刻歴応答解析を行い、得られた変形波形を、 $\sigma_D=0.5\text{cm}$ となるようにそれぞれを規準化した。図6に風方向および風直角方向でのダンパー変形 u_d の時刻歴波形を示す。

表2 入力用ランダムダンパー変形の統計値

Case		最大値 (cm)	最小値 (cm)	標準偏差 (cm)	N_0^*
2 1	A-3L	2.096	-2.055	0.5	3452
2 2	C-3L	1.791	-1.744	0.5	3460

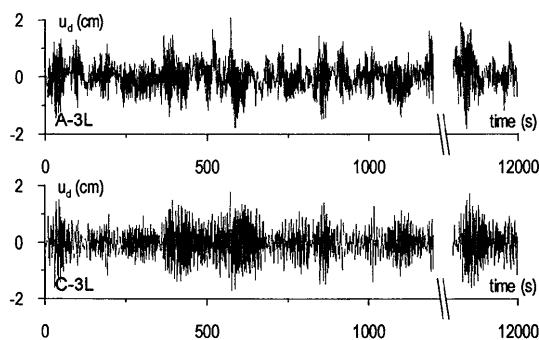


図6 ランダム波のダンパー変形の時刻歴波形

4.2 実験結果

図7にランダム波加振実験(A-3L, C-3L)より得られたA~D点における温度時刻歴を示す。図中には、次節で述べる長時応答解析法による結果も合わせて示している。10,000秒程度の加振で温度が一定となることがわかる。

図8にランダム波振動での実験より得られたダンパー変形 u_d - ダンパー力 F_d の履歴を示す。図9にダンパー変形を微分して算出したダンパー速度 \dot{u}_d - ダンパー力 F_d の履歴を示す。図10にランダム波と置換正弦波による実験の剛性と粘性係数の時刻歴変化を示す。風方向風力による風応答時のダンパーの等価貯蔵剛性 K_d' はダンパー変形-ダンパー力の履歴から式(3)の最小二乗法を用いて求める。また、風方向風力による応答時のダンパーの等価粘性係数 C_d' はダンパー速度 \dot{u}_d - ダンパー力 F_d の履歴より、式(6)の最小二乗法を用いて求める²⁾。Σは総和記号で、履歴のn個の $\dot{u}_{d,i}$, $F_{d,i}$ を対象とする。

$$C_d' = \frac{n \sum \dot{u}_{d,i} F_{d,i} - \sum \dot{u}_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum \dot{u}_{d,i}^2 - (\sum \dot{u}_{d,i})^2} \quad (6)$$

図7より長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーは、熱伝導・伝達の効果により温度が定常となるため、11,980~12,000秒での履歴より求めた K_d' , C_d' は、0~20秒での履歴から求めた値と比べると、最大で K_d' で0.655倍(A-3L)、 C_d' では0.863倍(A-3L)であり、実験開始直後から実験終了までダンパー特性の変化はあるが、図10から時間経過とともにその変化量は小さくなり定常状態となる。このような特性は、粘弾性ダンパーが風のような複雑な外乱に対しても有効であることを示すものである。

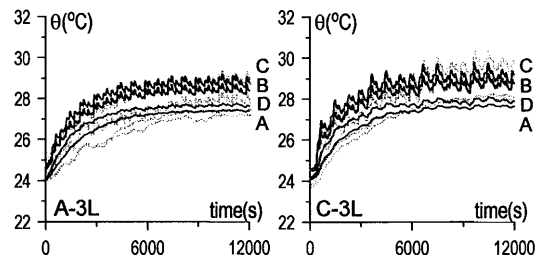


図7 ランダム波による実験と解析の温度時刻歴 (Exp. — Cal)

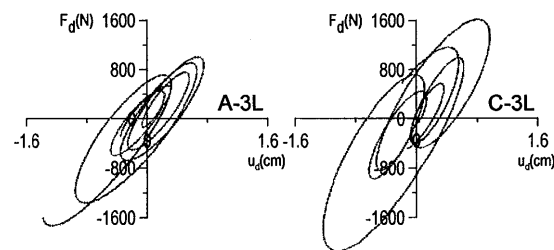


図8 ランダム波振動時のダンパー履歴

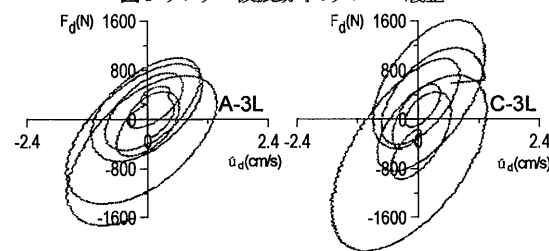


図9 ランダム波振動時の速度とダンパー力の履歴

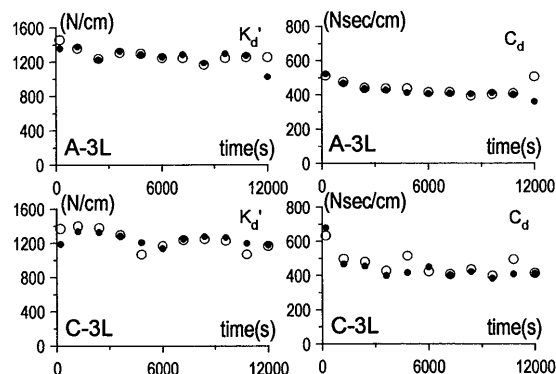


図10 ランダム波による実験と解析の剛性変化 (○Exp. ●Cal)

4.3 解析との比較

ランダム波による解析と実験の温度時刻歴を図7に示す。解析は熱伝達係数をA-3L, C-3Lのどちらも3.2節のCase1で決定した $\alpha_{ca} = 0.21$ (N/sec/cm²C), $\alpha_{cm} = 0.18$ (N/sec/cm²C)として行った。これは次章における表3の置換正弦波の最大速度=1.278cm/sec (A-3L), 1.281cm/sec (C-3L)がCase1の最大速度=1.256cm/sec (表1)に近いことから採用している。図7より温度時刻歴は解析の方が温度定常

までの時間が 8,000 秒程度と実験結果よりも短い結果となった。各点の定常状態での温度を比較すると A-3L は C 点はほぼ同様の結果となるが、A, B, D 点については異なる値となった。C-3L は B, D 点は値が一致しているが、他の点は多少ずれが生じている。

図 10 にランダム波による実験と解析の、貯蔵剛性と粘性係数の時間変化を示す。貯蔵剛性と粘性係数は解析結果が実験結果に近い値となったため、長時間のランダム波による振動についても本解析は妥当なものであるといえる。

5. 置換正弦波による加振

5.1 加振計画

2.2 節で述べた正弦波置換法により作成した置換正弦波による加振を行う。表 3 に実験名および、そのパラメータを示す。

正弦波置換法を実験にて検証する。4.2 節のランダム波加振における温度時刻歴変化の実験値と置換正弦波による温度時刻歴の実験値を比較し、その精度を検証する。表 3 は正弦波置換法により置換された置換正弦波の統計値である。

表 3 置換正弦波のパラメータ

Case		T _a (s)	A _r (cm)	f _r (Hz)	最大速度 (cm/s)
3 1	A-3L	12000	0.707	0.288	1.278
3 2	C-3L	12000	0.707	0.288	1.281

5.2 実験結果

図 11 にランダム波と置換正弦波による実験の A~D, H 点における温度時刻歴を示す。図中には、次節で述べるランダム波実験の結果も合わせて示している。置換正弦波による加振では 10,000 秒程度で温度が一定となる。

ランダム波と置換正弦波による実験における、貯蔵剛性と粘性係数の時間変化を図 12 に示す。図中には、次節で述べるランダム波実験の結果も合わせて示している。置換正弦波による加振では 10,000 秒程度でダンパー特性が定常状態になっている。これより、本研究の粘弾性ダンパーは長時間の加振で温度、ダンパー特性共に定常状態になることが確認できる。

5.2 ランダム波と置換正弦波の比較

図 11 にランダム波と置換正弦波による実験の A~D, H 点における温度時刻歴を示す。ランダム波、置換正弦波ともに 10,000 秒程度で温度が一定となる。これより、同一の粘弾性ダンパーにおいて振動数がほぼ同じであれば、温度が定常になるまでの時間はほぼ同じである。

A-3L と C-3L の温度時刻歴を比較すると、C-3L は温度時刻歴が置換正弦波のものとは比べて温度が少し高くなっている。

ランダム波と置換正弦波による実験の、貯蔵剛性と粘性係数の時間変化を図 12 に示す。ダンパー特性は、置換正弦波とランダム波を比較してほぼ同じ値を示している。ダンパー特性がほぼ同値であることから、置換振幅と置換振動数を正弦波置換法により算出することで、長時間のランダム振動時におけるダンパー特性の評価に対して、置換正弦波によって簡便に評価できることがわかる。

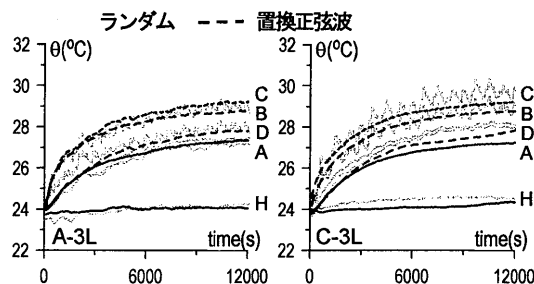


図 11 ランダム波と置換正弦波による実験の温度時刻歴

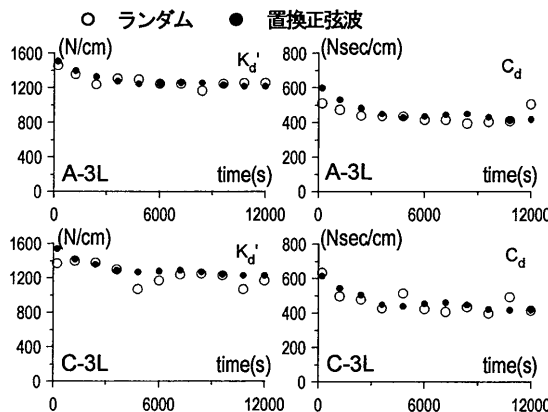


図 12 ランダム波と置換正弦波による実験の剛性変化

6. 結論

本研究は、長時間のランダム波加振での長時間応答解析法の妥当性の検証と、正弦波により長時間のランダム振動時のダンパー特性を評価する正弦波置換法の精度検証を目的として実験を行った。以下に結論を述べる。

1. 粘弾性ダンパーの熱伝達係数により、加振開始から温度が定常になるまでの時間が異なる。熱伝達係数の決定には注意し粘弾性体の厚さやダンパー速度を考慮して決定する必要がある。
2. 継続時間の長い風のような複雑な外乱に対しても粘弾性ダンパーは安定した特性を示す。
3. 正弦波置換法により得られる置換正弦波による加振では対象のランダム波加振と比べ、温度が定常になるまでの時間とダンパー特性の 2 つの点で似た特性を示す。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金・若手研究 (B) (19760383, 代表研究者: 佐藤大樹) の援助の下、実施いたしました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 笠井和彦, 佐藤大樹, 黄一華: 継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 599 号, pp.61-69, 2006.1
- 2) 佐藤大樹, 笠井和彦: 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.53B, pp.67-74, 2007.3

*1 東京理科大学建築学科 4 年
 *2 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士 (工学)
 *3 住友スリーエム(株) コンストラクションマーケット技術部
 *4 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)
 *5 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph.D