

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	2020 粘弾性ダンパーのモデル化の違いによる風応答特性の変化(構造)
Title	
著者(和文)	佐藤 大樹, 笠井和彦, 田村哲郎
Authors	daiki sato, KAZUHIKO KASAI, TETSURO TAMURA
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/110007453873

粘弾性ダンパーのモデル化の違いによる風応答特性の変化

構造—振動

正会員 ○ 佐藤大樹^{*1} 正会員 笠井和彦^{*2}〃 田村哲郎^{*3}

パッシブ制振 粘弾性ダンパー 風応答

振動数依存性 分数微分構成則 共振振動数

1. はじめに

粘弾性ダンパーは地震のような大振幅で高振動数の外乱だけでなく、風のように小振幅で低振動数の外乱まで効果的に振動エネルギーを吸収することから、高層建築の地震や風に対する制振には大変有効であると考えられる。

粘弾性ダンパーの履歴は、図1に示すような傾きを有する楕円形で、ダンパー特性は温度や振動数によって変化する。筆者らは、風外力は幅広い振動数成分を有するため(図2)、粘弾性ダンパーの有する振動数依存性が風応答に影響を及ぼすこと確認した¹⁾。文献1では、粘弾性ダンパーの振動数依存性を精度良く再現できる振動数依存性を有する粘弾性ダンパーのモデル化として Fractional Derivative²⁾(以下、FD)を用いて一質点系モデル(図1(a))による風応答時刻歴解析を行い、さらに振動数依存性の異なる Kelvin モデルおよび Maxwell モデルでの解析結果との比較することで、ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響を検討した。

本報では、4要素および6要素を用いた一質点系モデル(図1(b),(c))との応答比較を行い、文献1で得られた知見を基に、粘弾性ダンパーのモデル化の違いが風応答特性に与える影響について検討を行う。

2. 風力の作成

本報では、再現期間500年、粗度区分をⅢとして³⁾、文献3のパワースペクトル密度(PSD)をもとに、高さ方向の位相や相関を考慮して、風方向および風直角方向風力の50層の定常ランダム時刻歴波形をそれぞれ10波作成した。その際、AR法により時刻歴波形を作成し、風方向、風直角方向ともにデータ数16,384個、時間刻み $\Delta t = 0.05$ 秒(継続時間 $T_a = 819.2$ 秒)とした。応答解析時にはそれを $\Delta t = 0.01$ 秒に線形補間して用いた。作成した風方向および風直角方向

1次モーダル風力のPSDの一例を

図3に示す。なお、図3の縦軸は、振動数 f および風力の分散 σ_F^2 を用いて、風力のPSD($S_F(f)$)を無次元化している。また、図中の斜線部分はフレームの1次固有振動数の範囲を示している。図3より、

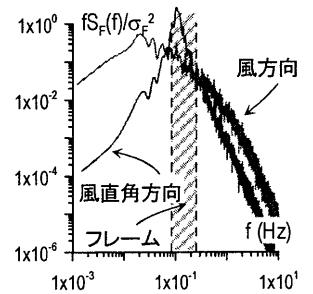


図2 変動風力 PSD の比較

風方向のPSDは、建物の固有振動数に比べ低振動数側にパワーをもつ広帯域な形状であるのに対し、風直角方向のPSDは0.1Hz周辺に鋭いピークを有する狭帯域な形状となることが分かる。また、風方向風力には平均風力を有する点が風直角方向風力と異なる点である。

3. 三種システムのパラメータ設定

3. 1 FD システムのパラメータ設定

本報では、文献1と同じ図3(a)に示すような、1質点モデルを用いる。また、ダンパーとブレースの直列系を付加系と呼ぶこととする。FDシステムは、5種類のフレーム(6H~2Hフレーム)に対し、それぞれ5タイプのシステムを設定した(表1)。フレーム剛性 K_f に対する共振振動数⁴⁾ ω_n でのダンパー剛性 $K'_d(\omega_n)$ との割合(ダンパー剛性比) $K'_d(\omega_n)/K_f = 2, 0.4$ に対し、フレーム剛性 K_f に対するブレース剛性 K_b の割合(ブレース剛性比) $K_b/K_f = \infty, 3$ をそれぞれ設定した(タイプ1~4)。さらに、 $K_b/K_f = 3$ で、共振振動数での減衰定数 ζ_n が2.0%になるような弱ダンパーも設定した(タイプ5)。

3. 2 4要素システムのパラメータ設定

4要素システム(図3(b))のパラメータの同定について述べる。4要素モデルでの貯蔵剛性 $K'_d(\omega)$ および損失係数 $\eta_d(\omega)$ はそれぞれ次式で表される²⁾。

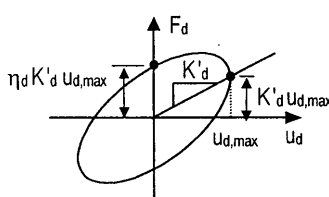


図1 定常振動時の履歴

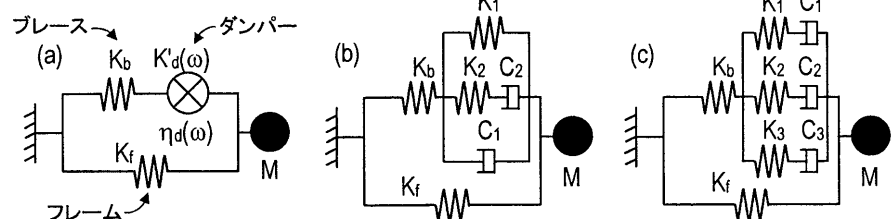


図3 三種システム:(a)FDシステム、(b)4要素システム、(c)6要素システム

$$K'_d(\omega) = K_1 + \frac{K_2(C_2\omega)^2}{K_2^2 + (C_2\omega)^2} \quad (1)$$

$$\eta_d(\omega) = \frac{C_1 \{ K_2^2 + (C_2\omega)^2 \} \omega + K_2^2(C_2\omega)}{K_1 \{ K_2^2 + (C_2\omega)^2 \} + K_2(C_2\omega)^2} \quad (2)$$

4要素モデルのパラメータ (K_1, K_2, C_1, C_2) は, FD モデルの共振円振動数での貯蔵剛性 $K'_d(\omega_n)$ と一致するように決定する。

3. 3 6要素システムのパラメータ設定

6要素システムのパラメータを決定する。6要素モデルでの貯蔵剛性 $K(\omega)$ および損失係数 $\eta(\omega)$ はそれぞれ次式で表される²⁾。

$$K'_d(\omega) = \sum_i^3 \frac{K_i(C_i\omega)^2}{K_i^2 + (C_i\omega)^2} \quad (3)$$

$$\eta_d(\omega) = \sum_i^3 \frac{K_i^2(C_i\omega)}{K_i^2 + (C_i\omega)^2} \bigg/ \sum_i^3 \frac{K_i(C_i\omega)^2}{K_i^2 + (C_i\omega)^2} \quad (4)$$

6要素モデルのパラメータ ($K_1 \sim K_3, C_1 \sim C_3$) も, FD モデルの共振円振動数での貯蔵剛性 $K'_d(\omega_n)$ と一致するように決定する。

3. 4 三種システムの振動数依存性の比較

それぞれのタイプにおいて4要素および6要素システムでの振動数による動的特性の違いを確認する。ここでは, 例として3Hフレームについて言及する。図4に3H1, 3H3システムでのダンパーの貯蔵剛性 $K'_d(\omega)$, ダンパーの損失係数 $\eta_d(\omega)$, 付加系の貯蔵剛性 $K'_a(\omega)$, 付加系の損失係数 $\eta_a(\omega)$, システムの固有振動数 f_n , システムの減衰定数 ξ'_n の振動数による特性の変化を示す。図中の一点鎖線は共振振動数 $f_n (= \omega_n/2\pi)$ である。いずれのタイプにおいても, 共振振動数で4要素および6要素システムがFDシステムと一致した特性を示していることが確認できる。

K'_d を比較すると, 4要素システムは $f=0$ においても K_1 (図3(b)) の剛性を持つが, 6要素は $f=0$ においては剛性を持たない。一方, FDモデルは GA_s/d の剛性を持つ点が大きく異なる。 η_d を見ると, 6

表1 検討三種システムの名称

K_f (N/m)	$K'_d(\omega_n)$ K_f	$\frac{K_n}{K_f}$	f_n (Hz)	ξ_n	FD システム	4要素 システム	6要素 システム
0.274	2.0	∞	0.144	0.224	F-6H1	4-6H1	6-6H1
	0.4		0.099	0.087	F-6H2	4-6H2	6-6H2
	2.0	3.0	0.127	0.095	F-6H3	4-6H3	6-6H3
	0.4		0.097	0.069	F-6H4	4-6H4	6-6H4
	0.077		0.086	0.020	F-6H5	4-6H5	6-6H5
0.395	2.0	∞	0.173	0.234	F-5H1	4-5H1	6-5H1
	0.4		0.118	0.091	F-5H2	4-5H2	6-5H2
	2.0	3.0	0.153	0.098	F-5H3	4-5H3	6-5H3
	0.4		0.117	0.072	F-5H4	4-5H4	6-5H4
	0.073		0.104	0.020	F-5H5	4-5H5	6-5H5
0.617	2.0	∞	0.217	0.246	F-4H1	4-4H1	6-4H1
	0.4		0.148	0.097	F-4H2	4-4H2	6-4H2
	2.0	3.0	0.191	0.102	F-4H3	4-4H3	6-4H3
	0.4		0.146	0.076	F-4H4	4-4H4	6-4H4
	0.068		0.129	0.020	F-4H5	4-4H5	6-4H5
1.907	2.0	∞	0.289	0.261	F-3H1	4-3H1	6-3H1
	0.4		0.197	0.103	F-3H2	4-3H2	6-3H2
	2.0	3.0	0.256	0.107	F-3H3	4-3H3	6-3H3
	0.4		0.195	0.081	F-3H4	4-3H4	6-3H4
	0.065		0.172	0.020	F-3H5	4-3H5	6-3H5
2.467	2.0	∞	0.433	0.281	F-2H1	4-2H1	6-2H1
	0.4		0.296	0.112	F-2H2	4-2H2	6-2H2
	2.0	3.0	0.385	0.113	F-2H3	4-2H3	6-2H3
	0.4		0.293	0.088	F-2H4	4-2H4	6-2H4
	0.057		0.257	0.020	F-2H5	4-2H5	6-2H5

要素は $f=0$ のでは無限大となる点がFDと異なる特性である。システムの減衰定数 ξ'_n を比較すると, $f=0$ でのFDおよび6要素では, 急激に増加するのに対して4要素は, ある値で頭打ちとなる。

Kelvin, Maxwell システムは, システムの固有振動数 f_n 以外の振動数, 特に風応答に影響の大きい低振動数範囲での特性がFDシステムと異なるモデルであるが¹⁾, 本報で用いる4要素および6要素システムは, f_n 以外の振動数での特性もFDシステムと近いことが図4から分かる。

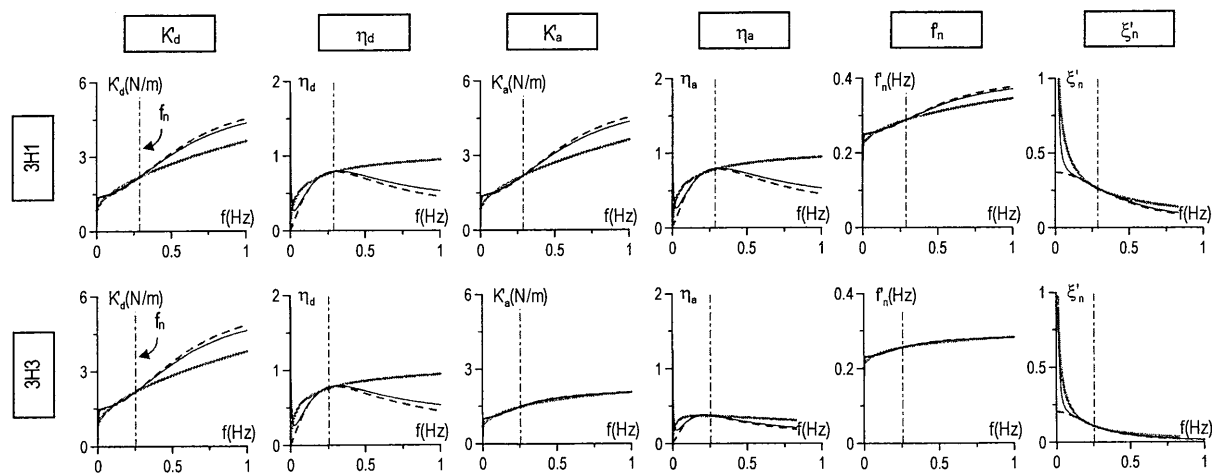


図4 振動数依存性の比較 ——— FD — — — 4要素 — · — 6要素 · · · · · f_n

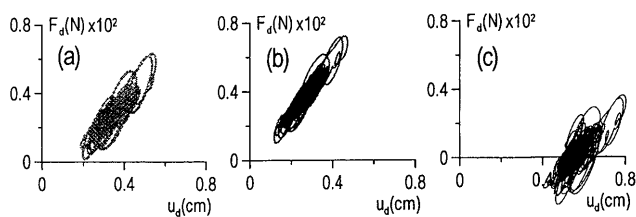


図5 履歴比較(風方向平均成分有, 3H1 システム):
(a)FD, (b)4 要素, (c)6 要素

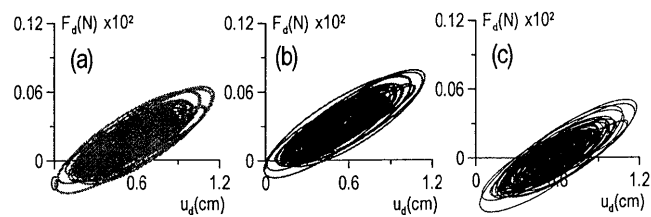


図6 履歴比較(風方向平均成分有, 3H5 システム):
(a)FD, (b)4 要素, (c)6 要素

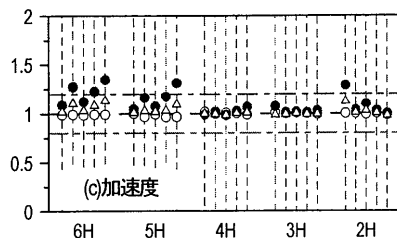
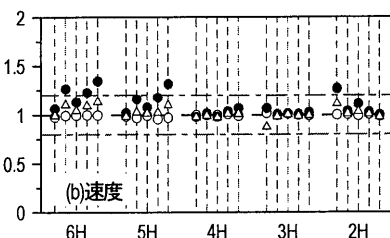
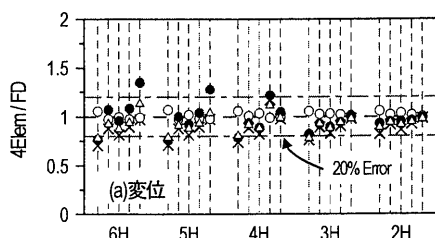


図7 VEシステムと4要素システムの比較(風方向): (各フレームにつき左からタイプ1, 2, ..., 5の順)

× 平均 ● 分散 ○ PF △ 最大

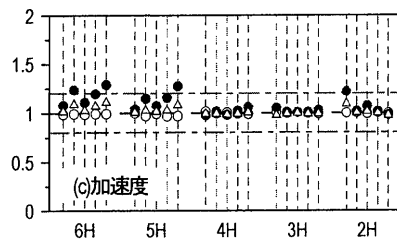
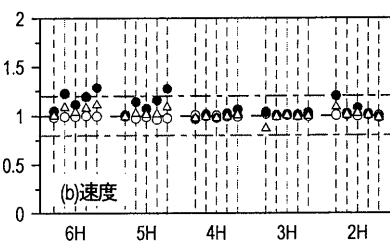
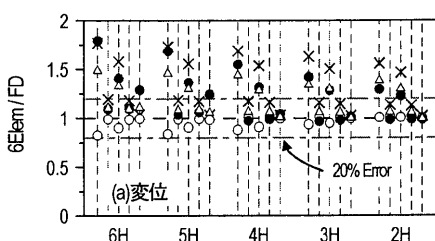


図8 VEシステムと6要素システムの比較(風方向): (各フレームにつき左からタイプ1, 2, ..., 5の順)

× 平均 ● 分散 ○ PF △ 最大

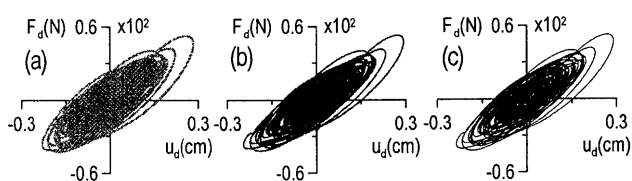


図9 履歴比較(風直角方向, 3H1 システム):
(a)FD, (b)4 要素, (c)6 要素

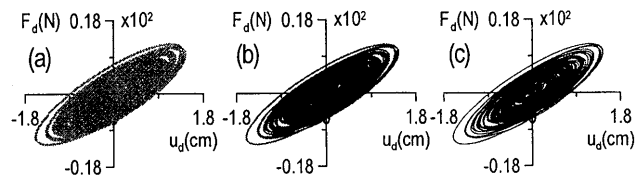


図10 履歴比較(風直角方向, 3H5 システム):
(a)FD, (b)4 要素, (c)6 要素

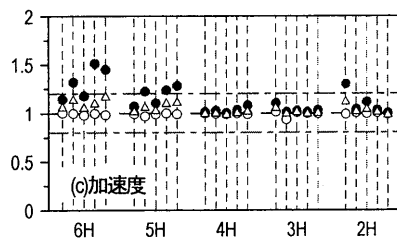
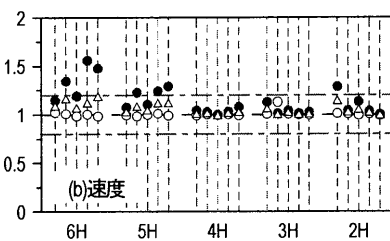
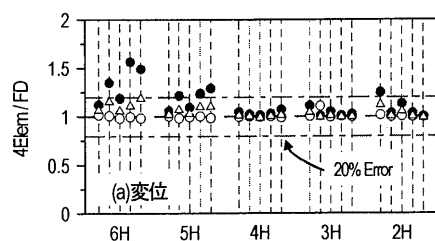


図11 VEシステムと4要素システムの比較(風直角方向): (各フレームにつき左からタイプ1, 2, ..., 5の順)

● 分散 ○ PF △ 最大

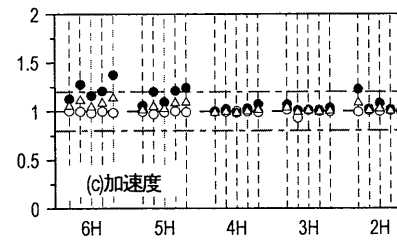
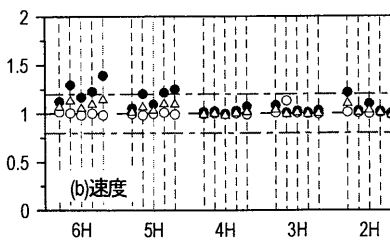
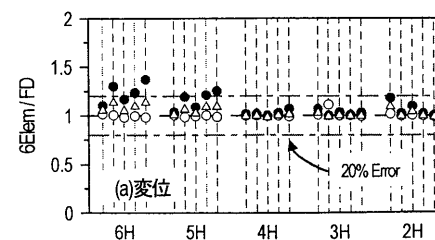


図12 VEシステムと6要素システムの比較(風直角方向): (各フレームにつき左からタイプ1, 2, ..., 5の順)

● 分散 ○ PF △ 最大

4. 風方向風力での4要素,6要素との応答特性比較

平均成分を有す風方向風力が作用した際のFD, 4要素および6要素システムでの応答特性の違いについて検討する。

図5, 6に3H1および3H5システムでの1次モードの層間変位に対応した履歴を示す。外力に平均成分を有する場合、変位応答にモデルによる違いが、ダンパーの寄与が大きい3H1システムで確認できる。これは、外力の平均成分に対するモデルの静的剛性(振動数をゼロとした場合の剛性)の違いが大きく影響しているためである。4要素モデルはFDモデルに比べ若干静的剛性が高いため、平均変位はFDシステムに比べ若干低くなる。逆に、6要素モデルはMaxwellモデルを並列に並べたものであるため静的剛性は無く¹⁾、静的剛性はフレームのみの剛性となるために平均変位が大きくなる。

図7に、4要素システムとFDシステムの建物頂部での(a)変位、(b)速度、(c)加速度の比較を全システムについて示す(10波のアンサンブル平均)。図6(a)の変位の平均値を見ると、4要素モデルはFDモデルに比べて静的剛性が高いため(図4)、4要素システムの静的変位はFDシステムに比べ小さい値となっている。特にダンパーの大きいシステムではその違いが大きくなる。4要素システムとFDシステムの分散は、同じフレームであってもタイプによって大小関係が異なることが分かる。ピークファクター(=最大値/標準偏差; 以下、PF)は、4要素システムの方が大きい値となるが、FDシステムとは20%以内の違いである。最大値を比較すると、4要素システムはFDシステムより小さい値を示し、2Hフレーム以外では20%程度の違いが確認できる。図7(b)速度や(c)加速度も変位と同様の傾向が確認できる。

6要素システムとFDシステムの応答値の比較を図8に示す。図8(a)変位の平均値において、6要素システムの静的剛性が低いため、FDシステムに比べ大きな値となる。6要素システムの分散もFDシステムに比べ大きいことが確認できる。その違いは4要素システムの場合に比べて顕著となる。PFはシステムによってばらつきが見られるものの、6要素での値は、FDに比べて小さい値を示すことが分かる。最大値は、システムの減衰が大きいほどFDシステムとの顕著な違いが確認できる。図8(b)の速度、図8(c)の加速度を見ると、6H, 5Hフレームにおいて分散の差異が確認できるものの、それ以外はFDシステムと同等の値を示していることが分かる。

5. 風直角方向風力での4要素,6要素との応答特性比較

風直角方向風力に対する3Hフレームでの4要素システムおよび6要素システムとFDシステムとの比較を行う。

図9, 10に3H1および3H5システムでの履歴を示す。それぞれの

図において、(a)FDシステム、(b)4要素システム、(c)6要素システムの1次モードの層間変位に対応した履歴である。

最も減衰の大きい3H1システムにおいても、FD, 4要素, 6要素システムのダンパーの履歴の履歴に大きな違いは見られない。これは、4要素, 6要素モデルが広い範囲でFDモデルと特性が一致するためであり、かつ風直角方向風力には平均成分がなく見かけの振動数と共振振動数の違いが大きくないことが理由である。

図11に、4要素システムとFDシステムの応答値のアンサンブル平均値の比較を(a)変位、(b)速度、(c)加速度について示す。図11より、変位、速度、加速度のいずれにおいても、分散は4Hフレームから振動数が離れるほど、FDシステムとの差異が大きくなる。本研究では、共振振動数でFDシステムと特性が一致するようパラメータを決定しているので、風直角方向風力の卓越振動数(図2)が、固有振動数に近い4HフレームはFDシステムとの違いは小さいが、フレームの固有振動数が風力の卓越振動数と離れるほど、FDシステムとの差異が大きくなる。

同様に、図12には6要素システムとFDシステムの応答値の比較を示す。6要素システムも4要素システムと同じ傾向であることが確認できる。

6. まとめ

本報では、粘弾性ダンパーのモデル化の違いが風応答に与える影響を検討するために、分数微分(FD)、4要素、6要素モデルを有する1質点のシステムでの風応答時刻歴解析を行い、比較検討を行った。以下に結論を述べる。

- (1) FD, 4要素, 6要素システムの応答を比較した場合、風方向では平均風力があり、かつ風力が広帯域のパワースペクトル密度を有するため、応答に差異が見られる。
- (2) 風直角方向風力の場合、風力の卓越周期と共振周期がずれることで、各モデルでの応答の違いが現れるが、その影響は余り大きくない。

参考文献

- 1) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第635号, pp. 75-82, 2009.1
- 2) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その1 線形領域における温度・振動数依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第543号, pp. 77-86, 2001.5
- 3) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善, 1997.4
- 4) 笠井和彦, 大熊潔: Kelvin 体による線形粘弾性ダンパー簡易モデル化と精度に関する考察(その1 弾性・弾塑性フレームをもつ一質点制振構造の場合), 日本建築学会構造系論文集, 第550号, pp. 71-78, 2001.12

*1 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

*2 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph.D.

*3 東京工業大学環境理工学創造専攻 教授・工博