

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	免震ダンパーの疲労損傷度と頂部平均風速の関係性に関する研究 - 考慮する強風イベントのサンプル数が関係式に与える影響 -
Title(English)	Study on relationship between fatigue damage degree of baseisolated damper and top average wind speed
著者(和文)	馬橋聖生, 佐藤大樹
Authors(English)	Sei Mabashi, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 489-492
Citation(English)	, , , pp. 489-492
発行日 / Pub. date	2019, 3

免震ダンパーの疲労損傷度と頂部平均風速の関係性に関する検討 ー考慮する強風イベントのサンプル数が関係式に与える影響ー

構造－振動

正会員 ○馬橋聖生^{*1}

〃

佐藤大樹^{*1}

超高層免震建物 時刻歴風応答解析 サンプル数
台風シミュレーション 疲労損傷度 頂部平均風速

1 はじめに

現行の日本の耐風設計は、原則として構造物の弾性範囲に対する設計となっており、構造物の風応答時の最大荷重効果（各部の変形や応力）を平均化時間10分とした統計データを基に評価が行われている。これに対し近年では、技術的な発展とともに超高層建物にも免震構造が積極的に採用されるようになってきた。建物が高層化すると地震外力に対して相対的に風外力が大きくなるのに加え、風外力は地震外力に比べ継続時間が長いといった特徴がある。また、免震構造は免震層の剛性を低くし、多部材に比べ免震装置の早期降伏を許容することにより、エネルギー吸収が行なわれ地震外力に対して有効な手段とされているが、風外力に対しては変形量を増大させてしまうというトレードオフの関係がある。そのため、現行の耐風設計で考慮されている弾性範囲に応答が収まらず、塑性範囲に及んでしまうことが懸念され、免震ダンパーの疲労損傷（以下、 D 値）の評価が重要となる。

高層建物など、風外力による影響が大きいとされる建築物を設計する際、対象建物を想定した風洞実験を実施し、風洞実験結果を基に最大荷重効果が期待される風向に対して、10分間の応答評価が行なわれているが、累積的な影響を考慮する必要のある D 値においては10分間の応答評価結果が、強風イベント全体の D 値に対してどの程度の割合を示すのか、また、実際の強風イベントでは風速・風向が時々刻々と変化するため、これらの変動因子が D 値に与える影響についても検討を行なう必要がある。一方で、風速・風向変化を同時に考慮し、強風イベント全時刻における D 値の精解値を得る方法として時刻歴風応答解析があるが、時間的制約の厳しい実設計において、この方法の負担は大きい。

こうした課題に対し、本研究の最終的な目的として、時刻歴風応答解析を実施することなく、 D 値を評価する方法として D 値と頂部平均風速 U_H との関係式を提案することにより、実設計において有用な手段となると考えている。しかし、 D 値と頂部平均風速 U_H の関係式の提案には、多数のパラメータを用いた時刻歴風応答解析を行なう必要があり、膨大な解析時間が必要となる。そこで、本論では、本研究の基礎検討として、 D - U_H 関係を表す関係式を導出する際に行なう時刻歴風応答解析に用いる強風イベントの適当なサンプル数について検討を行ない、導出した関係式により求めた予測値 pD と精解値 rD を比較することで関係式の整合性を確認する。

2 時刻歴風応答解析概要

2.1 解析モデルの概要

Table 1 に解析モデルの諸元を示す。解析モデルは、超高層免震建物を対象とした高さ $H=100$ m の11 質点せん断型モデルとし、辺長比 $B/D=1$ とした正方形の面積を有している。上部構造は、1 次固有周期 $1T_u=2.5$ s、建物密度 $\rho_u=250$ kg/m³の総重量 $W_u=98000$ kN とし、重量は高さ方向に一様であると仮定した。免震層の面密度は $\rho_b=3644$ kg/m²の総重量 $W_b=14284$ kN とし、免震周期 $1T_b=6$ s、ダンパー降伏せん断力係数 $\alpha_{dy}=0.04$ とした。

Table 1 Analysis model specification

建物高さ	H	m	100
平面積	A	m ²	400
辺長比	B/D	-	1
上部構造	密度 ρ_u	kg/m ³	250
	総重量 W_u	kN	98000
	減衰定数 h_u	-	0.02
	1次周期 $1T_u$	s	2.5
免震層	面密度 ρ_b	kg/m ²	3644
	W_b	kN	14284
	免震周期 $1T_b$	s	6.0
ダンパー降伏せん断力係数	α_{dy}	-	0.04

Fig. 1 に上部構造の概要を示し、Fig. 2 にダンパー、アイソレーター、およびそれらを組み合わせた免震層の復元力特性を示す。上部構造の各層の剛性 $u k_i$ は、1 次固有モードが直線となるように式(1)により決定した¹⁾。

$$u k_i = \frac{u s \omega^2 \cdot m_i \cdot \phi_i + u k_{i+1} (u s \phi_{i+1} - u s \phi_i)}{u s \phi_i - u s \phi_{i-1}} \quad (1)$$

ここで、 $u s \omega$ ：上部構造のみの s 次固有円振動数（ $=2\pi/1T_u$ ）、 m_i ： i 層の質量、 $u s \phi_i$ ：上部構造 i 層の s 次モードベクトルを表す。ただし、 $u k_{n+1}=0$ 、 $u s \phi_0=0$ とする。上部構造の構造減衰は上部構造の1 次固有周期に対して $h_u=2\%$ の剛性比例型とし、免震層には内部粘性を考慮しない。ここで、免震層の諸元は式(2)~(4)を用いて決定する。なお、ダンパーの2 次剛性比は0としている。

$$Q_{dy} = (W_u + W_b) \cdot \alpha_{dy} \quad (2)$$

$$k_{d1} = Q_{dy} / \delta_{dy} \quad (3)$$

$$k_f = \frac{4\pi^2(W_u + W_b)}{T_f^2 \cdot g} \quad (4)$$

ここで、 Q_{dy} : 免震層ダンパーの降伏耐力、 W_u : 上部構造の重量、 W_b : 免震層の重量、 k_{d1} : ダンパーの初期剛性、 δ_{dy} : ダンパーの降伏変形 (=2.80cm)、 α_{dy} : ダンパー降伏せん断力係数、 k_f : 免震層におけるアイソレータの1次剛性、 g : 重力加速度を表す。

以上の結果を用いて免震層の1次剛性 k_{01} 、2次剛性 k_{02} 、降伏耐力 Q_{0y} は式 (5)~(7) で算出される。

$$k_{01} = k_{d1} + k_f \quad (5)$$

$$k_{02} = k_f \quad (6)$$

$$Q_{0y} = k_{01} \cdot \delta_{dy} \quad (7)$$

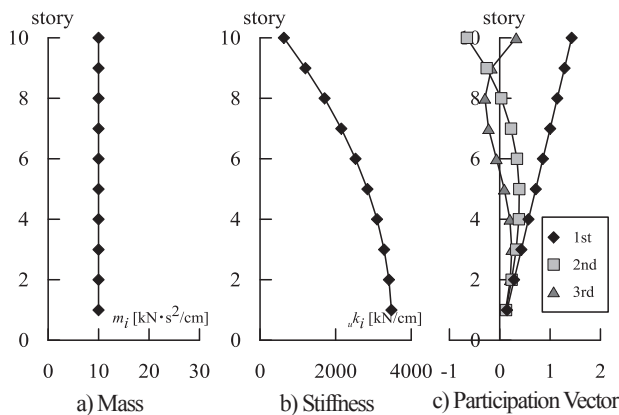


Fig. 1 Upper building characteristics

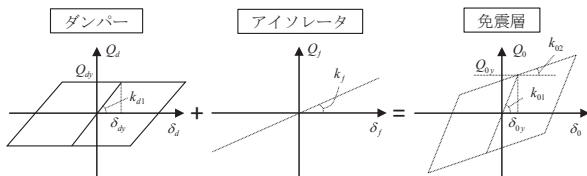


Fig. 2 Isolation layer restoring force characteristics

2.2 検討用風外力

Fig. 3 に、台風シミュレーション²⁾より得られた頂部平均風速の時刻歴変化を示す。本解析では、東京都に発生が予測される強風イベントの中から、地上高さ 10 m の最大平均風速が再現期間 500 年相当のものに近く、頂部最大平均風速付近の継続時間が短いもの、長いもの（以下、S500、L500）をそれぞれ 5 波ずつ用意する。本解析では、基本風速 $U_0=38$ m/s、再現期間 500 年相当の風速 $U_{500}=40$ m/s とする。また、頂部最大平均風速は式 (8) より算出する。

$$U_H = U_{500} K_D K_S E_H \quad (8)$$

ここで、 K_D : 風向係数 ($K_D=1$)、 K_S : 季節係数 ($K_S=1$)、 E_H : 風速の鉛直分布係数（地表面粗度区分Ⅲに換算）を表す。式 (8) より求めた 10 分間頂部平均風速 $U_H=50.41$ m/s である。本解析では台風の発生から終了までの全時刻の内、地上高さ 10 m における風速が 10 m/s より大きくなった時刻から 10 m/s を下回った時刻までを一つの強風イベントと定義している。

時刻歴風外力は、Fig. 3 に示す頂部平均風速の時刻歴波形と、風洞実験結果³⁾より 10 分間毎の各層風外力を作成し、文献 (4) を参考に 10 分間毎の風外力をつなぎ合わせることで、一つの強風イベントを作成する。また、それぞれのサンプルにおいて、使用する層風力係数の組み合わせを辺こすることにより Wave 1~5 までの風外力を作成している。風外力の入力風向は 0° 、 22.5° 、 45° とし、一つの強風イベント中は全時刻において風向は一定とする。

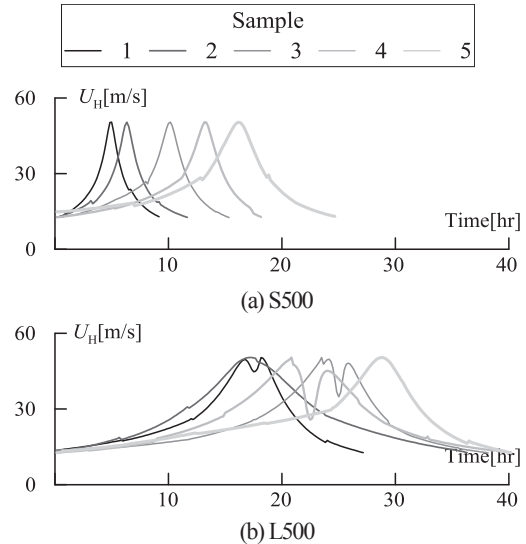


Fig. 3 Average wind speed at $H=100$ m

3 D - U_H 関係式の作成

3.1 時刻歴風応答解析結果より導出する関係式

D 値と頂部平均風速 U_H の関係式の導出には、時刻歴風応答解析結果を用いる。免震層変形の時刻歴波形から求まる 10 分毎の D 値^{5,6,7)}と、その時刻に該当する頂部平均風速 U_H 関係をプロットし、最小二乗法を用いて関係式を導出する。ここで、近似式を導出するには、頂部平均風速 $U_H=40$ m/s 以上に該当するプロットのみを用い、近似式の導出を行なっている。これは、全風速範囲におけるプロットを用いて導出された近似式の場合、風速の大きな範囲で解析値と近似式に大きな乖離が確認されたことから、1 イベント全体の D 値に対し 90% 以上を占める風速を目安として、近似式の導出に用いる風速の範囲を限定する。

3.2 強風イベントのサンプル数による関係式への影響

本節では、前節で示した関係式を導出する際に考慮するサンプル数（つまりは、プロット数）をパラメータとし、各関係式の対応関係を確認する。ここでは、強風イベントの継続時間が最も短い S500 の Sample1 から最も長い L500 の Sample5 間での 10 波の内、短いものから順に、3 波分、5 波分、10 波分の 3 ケースについて関係式を導出する。Table 2 に、解析ケースの定義を示す。

Table 2 Definition of analysis

Case 1	S500 Sample 1 ~ 3
Case 2	S500 Sample 1 ~ 5
Case 3	S & L500 Sample 1 ~ 5

Fig. 4(a)~(f)に, Case 1, Case 2, Case 3 の 10 分毎に算出された D 値と, その時刻に該当する頂部平均風速 U_H の関係図を示す. ここでは紙幅の都合により, 0° の風向における結果のみを示している. 図内に示される実線は解析結果より, 最小二乗法を用いて算出された近似曲線である. 式 (9) に近似式を用いた予測値 ${}_pD$ と頂部平均風速 U_H の関係式を示し, Table 3 (a),(b) に, 各ケースの係数 C , α を示す.

$${}_pD_{10} = C \cdot U_H^\alpha \quad (9)$$

Fig. 5 に, 各ケースにおける関係曲線の比較図を示す.

Fig. 4 より, サンプル数の少ない Case 1 に対して, Case 2, 3 では, 値の大きな D 値が確認できるが, そのデータ数は僅かであり, 関係式に大きな影響は無いと考えられる. その裏づけとして, Table 3, Fig. 5 より, 各解析条件における関係式を比較すると, ほとんど一

致した結果が確認できる. これより, サンプル数による ${}_pD$ と頂部平均風速 U_H の関係式への影響は十分に小さいと考えられる.

3.3 $D - U_H$ 関係式の整合性

前節では, D 値を予測する関係式を導出するに際しに用いる強風イベントのサンプル数は 3 波以上で結果に大きな差が無いことを示した. そこで本節では, Case 1 の関係式による予測値 ${}_pD$ を用いて S500, L500 の精解値 ${}_rD$ を評価し関係式の整合性を確認する.

Fig. 7(a)~(e), Fig. 8(a)~(e) に, 風外力の入力風向を 0° とした場合における, Case 1 の関係式を用いて算出した 10 分間疲労損傷度予測値 ${}_pD_{10}$ と時刻歴応答解析の精解値 ${}_rD_{10}$ を示す. Fig. 6, 7 より, 予測値 ${}_pD_{10}$ と精解値 ${}_rD_{10}$ の時刻歴波形はおおよそ一致していることが確認できる. また, 別風向 (22.5° , 45°) においても同様に, 良い精度で評価ができていることを確認している. Table 4 に, 風外力の入力風向を

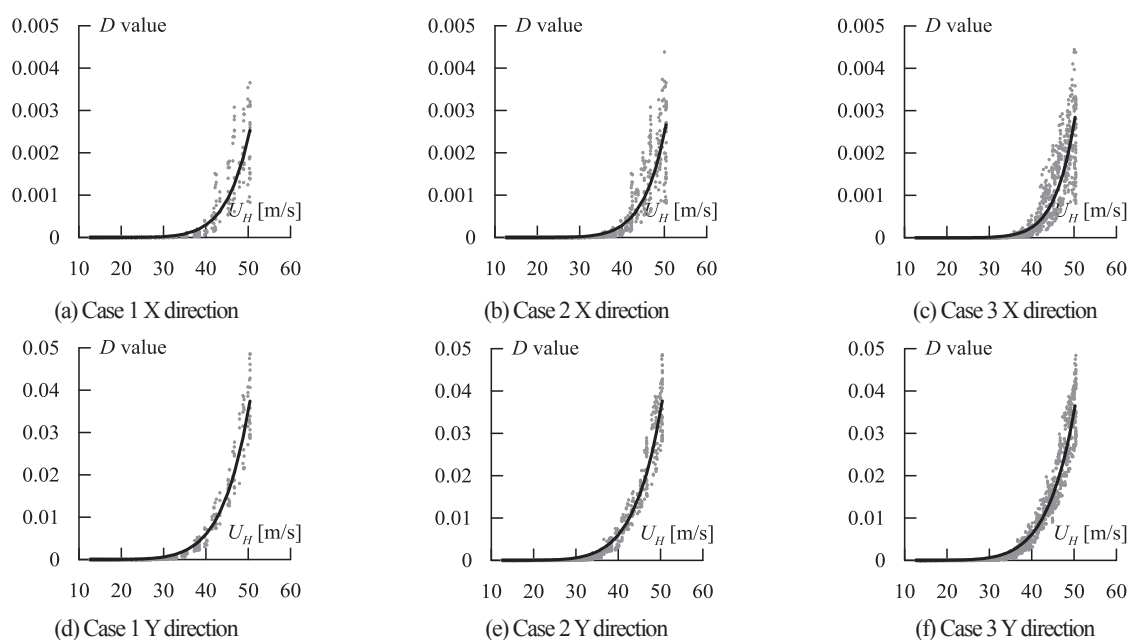


Fig. 4 Plots relation between D_{10} and U_H

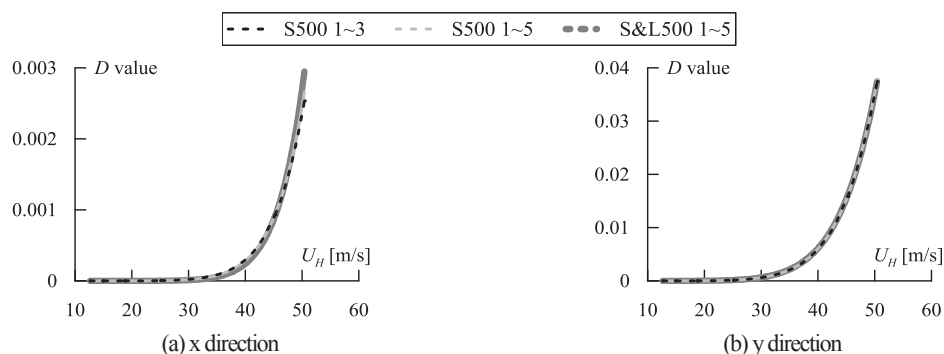


Fig. 5 Comparison ${}_pD$ of cases 1-3

Table 3 Coefficients C and α of cases 1-3

(a) x direction		0°	22.5°	45°
C	Case 1	4.0.E-19	8.9.E-26	8.5.E-24
	Case 2	9.3.E-20	2.9.E-25	4.8.E-24
	Case 3	1.0.E-21	2.2.E-24	7.2.E-23
α	Case 1	9.3	13.0	11.9
	Case 2	9.7	12.7	12.0
	Case 3	10.8	12.1	11.3

(b) y direction		0°	22.5°	45°
C	Case 1	1.1.E-15	5.3.E-23	2.9.E-26
	Case 2	1.2.E-15	1.2.E-22	1.4.E-26
	Case 3	1.7.E-15	3.6.E-23	1.2.E-26
α	Case 1	7.9	11.8	13.4
	Case 2	7.9	11.6	13.6
	Case 3	7.8	11.9	13.6

0°とした場合における、それぞれの強風イベント全時刻における免震ダンパーの疲労損傷度 pD 、 $F D$ の比を示す。ここで、強風イベント全時刻における免震ダンパーの疲労損傷度 pD 、 $F D$ の定義を以下に示す。

$$pD = \sum_{j=1}^N pD_{10}(U_H^{(j)}, 0) \quad (10)$$

$$FD = \sum_{j=1}^N FD_{10}(U_H^{(j)}, 0) \quad (11)$$

Table 4 pD divided by FD

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
S500	1.03	1.02	1.03	1.03	1.01
L500	0.98	0.99	1.01	1.03	1.01

Table 4 より、Case 1 の関係式により算出された予測値 pD と、精解値 FD との差は最大で3%程度であり、本関係式の整合性は十分に高いことが考えられる。

5 まとめ

本論では、免震ダンパーの疲労損傷度の簡易評価式を提案する基礎研究として、関係式の導出に必要な強風イベントのサンプル数について検討を行なった。

得られた知見として、台風シミュレーションにより得られた強風イベントの内、それぞれ3波、5波、10波分のデータを用いて導出した関係式には大差は無かった。そのため、全時刻一定風向で入力された風外力による D 値を評価する際には、3波分のデータのみを用いた関係式でも十分な整合性を備えた評価ができることを確認した。

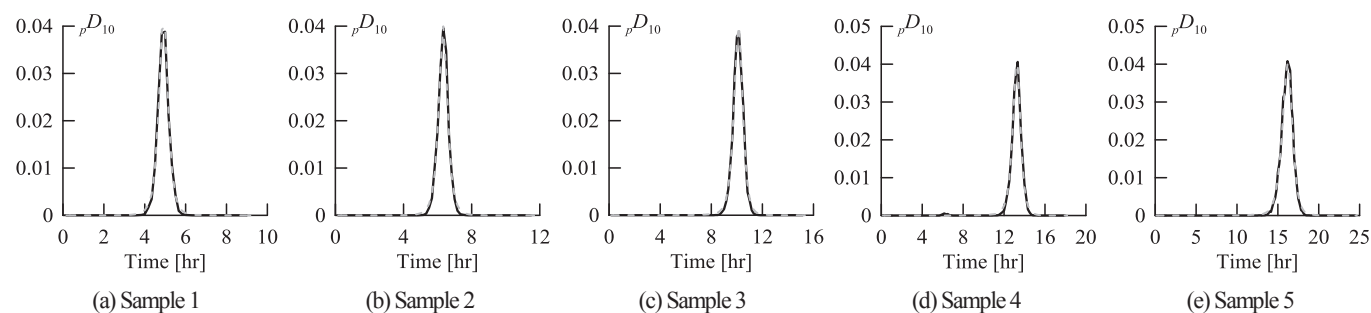


Fig. 6 Comparison of pD and FD of S500

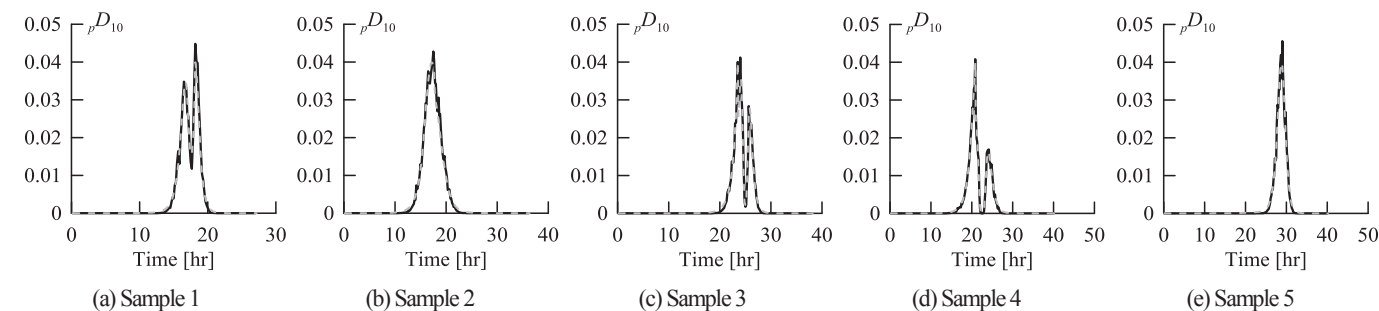


Fig. 7 Comparison of pD and FD of L500

謝辞

本研究は、日建設計株式会社、泉創建エンジニアリング、神奈川大学工学研究所大熊武司客員教授、東京工業大学佐藤研究室による新耐風設計法研究会の皆様との多大なる協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

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幅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) 団栗直希、西嶋一欽：確率台風モデルに基づくハザード適合最尤台風の方法、平成29年度京都大学防災研究所研究報告発表会、B19、2018.3
- 3) 丸川比佐夫、大熊武司、北村春幸、吉江慶祐、鶴見俊雄、佐藤大樹：風洞実験に基づく高層建物の多層層風力によるエネルギー入力性状（その2 矩形高層建築物に作用する層風力特性）、日本建築学会学術講演梗概集、B-1、pp.193-194、2010.7
- 4) 鈴木雅晴、竹中康雄、近藤明洋、飯場正紀、大熊武司、松井正宏：高層免震建築物の風応答時刻歴解析による検討（その3 風向変化を伴う3方向風力時刻歴波形の作成）、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.613-614、2011.8
- 5) 村上智一、佐藤大樹、田村哲郎、普後良之、吉江慶祐、笠井和彦、佐藤和昭、北村春幸：強風時の観測記録に基づく超高層免震建物の実挙動の分析、構造工学論文集、Vol.62B、pp.329-337、2016.3
- 6) 遠藤雄雄、安在弘幸：簡明に記されたレインフローアルゴリズム「P/V 差法」について、材料、Vol.30、No.328、pp.89-93、1981.1
- 7) 吉敷洋一、大河原勇太、山田哲、和田章：免震構造用U字形鋼材ダンパーの繰返し変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第73巻、第624号、pp.333-340、2008.2

School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

*1 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院 建築学系

Tokyo Institute of Technology

*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士（工学）