# T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

# 論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	   長時間風応答時の粘弾性ダンパーの動的特性変化の簡易予測  	
Title(English)	SIMPLE PREDICTION METHODS FOR DYNAMIC CHARACTERISTIC CHANGE OF VISCOELASTIC DAMPER UNDER LONG-TERM DURATION LOADING	
 著者(和文)		
Authors(English)	Shohei Okuda, Daiki Sato, Dave M Osabel	
出典(和文)	構造工学論文集, Vol. 67B, ,pp. 691-700	
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 67B, , pp. 691-700	
発行日 / Pub. date	2021, 3	

# 長時間風応答時の粘弾性ダンパーの動的特性変化の簡易予測

### SIMPLE PREDICTION METHODS FOR DYNAMIC CHARACTERISTIC CHANGE OF VISCOELASTIC DAMPER UNDER LONG-TERM DURATION LOADING

## 奥田 翔平<sup>\*1</sup>, 佐藤 大樹<sup>\*2</sup>, Dave M. Osabel<sup>\*3</sup> Shohei Okuda, Daiki SATO, Dave M. OSABEL

In recent years, high-rise buildings require countermeasures against long-period ground motion in urban areas because of the Nankai Trough earthquake and long-term wind vibration. Therefore, countermeasures against long-term vibrations in high-rise buildings has gained research interest. As one of the measures, a damping structure using a damper can be considered. Especially, Viscoelastic (VE) damper is one of the types of effective vibration passive control devices for earthquake and wind loadings because it effectively absorbs vibration energy for both low- and large-amplitude, and low- and high-frequency excitations. In addition to the heat generated due to energy dissipated, the effect of heat conduction and convection becomes significant under long-duration vibration and must be taken into consideration in the design of VE-damped high-rise building. There had been previously proposed methods which considers such effects but these methods require advanced knowledge and tools which may not be readily available to designers. This paper, therefore, proposes simplified methods in predicting the dynamic characteristic of VE damper under long-duration loading based on the closed-form solution of steady-state heat transfer analysis. Results from the analysis of VE damper under long-duration harmonic loading using these simplified methods are very similar to those of the previously proposed methods.

Keywords: Viscoelastic damper, long-duration loading, steady-state heat transfer analysis, simple prediction methods 粘弾性ダンパー,長時間加振,定常熱伝導解析,簡易予測手法

#### 1. はじめに

#### 1.1 研究背景

近年,超高層建物において,発生が予想 <sup>1</sup>されている南海トラフ 地震による都市部での長周期地震動への対策に加え,長時間の風の 振動よって居住者が不快に感じないようにすることが要求される <sup>2</sup>)。 そのため超高層建物における継続時間の長い振動への対策に関心が 高まっている。この対策のひとつとして,ダンパーを付加する制振 構造が考えられる <sup>3</sup>)。しかし,ダンパーの種類によっては継続時間 の長い振動時にその性能が低下するため,超高層の制振構造建物を 設計する際は,その性能低下を考慮した設計が求められる。このこ とより継続時間の長い振動に対する制振部材の性能に関する研究が, 粘性ダンパーやオイルダンパー,鋼材ダンパーなどを中心に近年積 極的に進められている<sup>例えば 4)~8</sup>。

粘弾性ダンパーは大振幅で高振動数の外乱だけでなく,小さな振 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,地震および風に有効な制振部材のひとつである。しかし,粘弾 性ダンパーは剛性や粘性といった動的特性が振動時に複雑に変化す るため,粘弾性ダンパーを有する建物を設計するときは,その動的 特性変化に伴うダンパーの性能変化を考慮する必要がある。特に継 続時間が長い振動時は、温度上昇に加え、熱伝導・伝達の影響も大 きくなるため、粘弾性ダンパーを有する超高層の制振構造建物にお いては、それらの影響を考慮した設計が求められる<sup>3)</sup>。しかし、長 時間振動時の粘弾性ダンパーの性能変化の研究は少なく<sup>例えば 6,9,10</sup>、 その中でも熱伝導・伝達を考慮した性能変化に関する研究はあまり 行われていないのが現状である<sup>例えば 11)~13</sup>。

熱伝導・伝達を考慮した長時間振動時の粘弾性ダンパーに注目し た研究として,文献 11), 12)が挙げられる。文献 11)は温度振動数 依存性を考慮した解析モデル<sup>14)</sup>と非定常熱伝導解析を組み合わせ, 継続時間の長い振動時の粘弾性ダンパーの剛性や粘性とった特性値 を求める解析手法を提案されている。また文献 12)では選定や作成 が煩雑である長時間のランダム波を,ある正弦波に置換する方法(正 弦波置換法)<sup>15)</sup>を用いて,長時間加振時のダンパーの特性値の簡易 評価手法を提案している。これらの文献において,継続時間長い振 動時は,熱伝導・伝達の影響により,ある時点で吸収エネルギー量 と放出エネルギー量が釣り合い,温度が定常状態になるに伴い,動 的特性も一定値を取ることが実験及び解析から確認された。しかし, これらの手法は精度よくダンパーの特性変化を予測・評価すること が可能であるが,解析をすること自体に高度な知識を必要とし,ま

*1東京工業大学 環境・社会理工学院	大学院	Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technolog
*2東京工業大学 未来産業技術研究所	准教授・博士 (工学)	Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*3東京工業大学 環境・社会理工学院	博士	Doctor Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

た実施できる環境・ソフトウェアを有することが必要となる。この ような粘弾性ダンパーの評価手法をより簡便・簡易的なものにする ことは、熱伝導・伝達の影響を考慮した制振構造の設計手法の構築 に必要不可欠である。

#### 1.2 本論文の目的と構成

本論文では,解析条件を簡易化した上でも,粘弾性ダンパーの熱 伝導・伝達だけでなく,温度・振動数依存性を考慮した性能評価を 行う簡易評価手法を提案する。長時外乱加振時,ダンパー特性が定 常状態になることに注目し,簡易的にモデル化した粘弾性ダンパー においての定常状態の理論式を用いることにより,ダンパー特性の 簡易予測法を提案する。本論文では,文献12)の長時間ランダム波加 振実験結果および正弦波加振実験結果と本手法を比較することでそ の精度を確認する。

以下に本論文の構成を述べる。2章では、文献12)の長時間ランダ ム波加振実験結果および正弦波加振実験の概要について述べる。3 章ではモデル化の説明、および提案する予測法の説明を行う。4章 では実験結果と簡易予測法の予測値の比較を行い、その精度を検証 する。

# 2. ランダム波および正弦波の長時間加振実験の概要

### 2.1 ランダム波および置換正弦波の諸元

本章では、文献 12)の粘弾性ダンパーのランダム波および正弦 波加振実験の概説を行う。特に、本論文で提案する予測手法が正 弦波振動時の理論に基づく予測法であるものの、後述する正弦波 置換法を介することでランダム振動時の特性値の予測を行える ことを示すと同時に、ランダム波加振時と置換正弦波加振時の実 験時の精度を示すことが本章の目的である。詳細は文献 12)を参 照されたい。本節では、実験で使用した入力波の諸元およびその 作成方法について概説する。

この実験は、高さ200m、幅・奥行が等しく50mの超高層建物 の風応答を対象としている。この実験では、建物固有周期、およ び減衰が異なる4つの対象建物モデルにおける風方向および風直 交方向の風応答をもとに入力ランダム波を作成し、粘弾性ダンパ ーへの長時間加振実験を行い、その特性変化を確認している。ま た作成したランダム波から正弦波置換法<sup>15</sup>により入力正弦波を 作成し、同様に加振実験を行い、特性変化の確認を行うとともに、 ランダム波結果と正弦波加振実験の整合性の検証をしている。

以下に実験で使用した入力正弦波およびランダム波について 述べる。Table 1 に入力ランダム波の諸元をまとめる。この実験に おいて長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性変化に影 響を与えるパラメータを検討するため、ダンパー変形の標準偏差 が $\sigma_u = 5.0 \text{ mm}$ となるように基準化している。また、風方向風力 は平均成分を有するが、本論文では変動成分のみを用いている。 なお、表中の A:風方向、C:風直交方向、L:低減衰(h=2%)、H:高 減衰(h=10%)であり、数字は1質点系モデルの固有周期  $T_0$ を 意味する。そして P.F:ピークファクター(=最大値/標準偏差)、  $N_0^+$ :12000秒間で変形波形がゼロ軸の正の傾きで超える数(以下、 繰り返し回数)である。また、本実験に用いたアクリル系の粘弾 性体(2.2節)は線形性が強く、ダンパーの最大変形  $u_{d,max}$ は本実 験の振動数・温度において概ね線形とみなせる範囲にある。Table 2にTable1で示したランダム波に対する正弦波置換法<sup>15)</sup>で得られ た置換正弦波の諸元を示す。正弦波置換法とは、長時間のランダ ム振動時における、粘弾性ダンパーの特性を決定する重要なパラ メータであるダンパー変形の標準偏差*σ*<sub>u</sub>、繰り返し回数 *N*<sub>0</sub><sup>+</sup>,お よび振動時間 *t*<sub>a</sub>をもとに、ランダム波を一定の振幅と振動数で表 される正弦波に置換する手法である。正弦波置換法により、置換 振動数 *f*,および置換振幅 *A*,は、ランダム振動時のダンパー変形の 繰り返し回数 *N*<sub>0</sub><sup>+</sup>,振動時間 *t*<sub>a</sub>及び標準偏差*σ*<sub>u</sub>を用いて次式より 算出される<sup>15</sup>。

$$f_r = \frac{N_0^+}{t_a}$$
 (1)  $A_r = \sqrt{2}\sigma_u$  (2)

なお, √2 は正弦波における理論値の P.F.を意味する。Fig.1 に実 験の代表的なケースとして A-3L と C-3L におけるランダム波と それに対応する置換正弦波のダンパー変形の時刻歴を示す。

Table 1 Damper deformation: random

Case	<i>u</i> <sub>d</sub> Max (mm)	<i>u</i> <sub><i>d</i></sub> Min (mm)	$\sigma_u$ (mm)	P.F.	$N_0^+$
A-3L	21.0	-20.6		4.2	3,452
A-3H	24.4	-16.9	5.0	4.9	2,018
A-6L	17.9	-16.6	5.0	3.6	1,728
A-6H	23.3	-16.2		4.7	1,296
C-3L	17.9	-17.4		3.6	3,460
C-3H	19.9	-19.6	5.0	4.0	1,820
C-6L	14.7	-16.0	5.0	3.2	1,780
C-6H	17.1	-20.4		4.1	1,580

Table 2 Damper deformation: equivalent sinusoidal wave

Case	t <sub>a</sub> (s)	<i>A</i> <sub><i>r</i></sub> (mm)	<i>f</i> <sub><i>r</i></sub> (Hz)	<i>ū<sub>d</sub></i> Max (mm∕s)
A-3L			0.288	12.79
A-3H	12 000	7.07	0.168	7.46
A-6L	12,000	7.07	0.144	6.40
A-6H			0.108	4.80
C-3L			0.288	12.79
C-3H	12 000	7.07	0.152	6.75
C-6L	12,000		0.148	6.57
C-6H			0.132	5.86



#### 2.2 ダンパーおよび計測の概要

本節ではこの実験で使用された粘弾性ダンパーの説明,および計 測の説明を行う。実験で使用された粘弾性ダンパーの詳細図を Fig.2 に示す。このダンパーは 2 層の 2 層のアクリル系粘弾性体材料 (3M Japan 製 ISD111)を厚さ  $d_v = 12 \text{ mm}$  鋼材の中板・外板の間に挟んだ 両面せん断型である。粘弾性体の幅と長さはそれぞれ B = 80 mm, L = 160 mm (せん断面積  $A_s = 25,600 \text{ mm}^2$ ),厚さ  $d_v = 16 \text{ mm}$ である。

粘弾性ダンパーの温度は、Fig. 2 に示すように、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。つまり両側の 粘弾性体について計 8 点計測する。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、また周辺温度の温度変 化による影響を極力無視するため、外気温は加振終了までの間、常 に一定の温度 = 24℃となるように維持した。時間刻みは $\Delta t$  = 1.0 s と して加振開始から終了まで測定した。一方、ダンパーの荷重  $F_d$  と変 位 $u_d$ は $\Delta t$  = 0.01 s として計測を行った。これは置換正弦波において、 最も振動数が高い A-3L および C-3L 実験時に 1 サイクル当たり 300 点以上を計測できるようにするためである。ただし、計測を行う機 器の容量上すべての時間で計測が行えないため、Fig. 3 に示すよう に振動時間 12000 秒の間で 1200 秒ごとに置換正弦波の 5 サイクル に対応する時間: $t_m$ 秒間ずつ( $t_m$ :計測時間)のみ計測を行った。な お Fig. 3 に示す A-3L においては  $t_m$  = 80 s である。



#### 2.3 貯蔵剛性・粘性係数の実験値の評価方法

本節では,実験における貯蔵剛性 K'<sub>a</sub>と粘性係数 C<sub>a</sub>の評価方法について述べる。なお、本論文では貯蔵剛性 K'<sub>a</sub>と粘性係数 C<sub>a</sub>を動的 特性と呼ぶこととする。

Fig. 4(a)に加振開始から 0~80 秒の間に実験で計測された A-3L ケースにおけるランダム波および置換正弦波加振時のダンパー変形 u<sub>d</sub> とダンパー荷重 F<sub>d</sub> のループ,またダンパー変形を微分して算出 したダンパー速度 i<sub>d</sub> とダンパー荷重 F<sub>d</sub> のループをそれぞれ示す。 同様にして Fig. 4(b)に加振開始から 3600~3690 秒の間に実験で計測 された A-3H ケースにおけるランダム波および置換正弦波加振時の ダンパー変形  $u_d$  とダンパー荷重  $F_d$ , ダンパー速度  $\dot{u}_d$  とダンパー 荷重  $F_d$  のループをそれぞれ示す。Fig.4 に示すように, 実験におけ る  $K'_d$ の値 は  $u_d$  と  $F_d$  のループの傾きであり,  $C_d$ の値は $\dot{u}_d$  と  $F_d$ のループの傾きであることから, それぞれ最小二乗法により以下の 式で算出できる <sup>16</sup>。ただしNは計測データの個数である。

$$K'_{d} = \frac{N \sum u_{d} \cdot F_{d} - \sum u_{d} \sum F_{d}}{N \sum u_{d}^{2} - (\sum u_{d})^{2}}$$
(3)

$$C_d = \frac{N\sum \dot{u}_d \cdot F_d - \sum \dot{u}_d \sum F_d}{N\sum \dot{u}_d^2 - (\sum \dot{u}_d)^2}$$
(4)

そして,以上の式より算出したそれぞれのループの傾きを Fig.4 中に破線として示す。ほとんどのケースにおいて最小二乗法により 適切にループの傾きを導出できていることが確認できる。ただし、 Fig4(b)の A-3H ケースにおける貯蔵剛性 K'aについては、その傾きが 過小評価されていることが確認される。これは、静的な力の性質を 持つ風力の準静的成分の影響により、履歴の中心位置が移動したこ とが原因である。このように風方向でかつ減衰の高い A-3H のよう な風の準静的成分の影響が大きい時における貯蔵剛性の適切な評価 方法 K'aについては付録 C に詳しく記載する。



Fig. 4 Random vs. sinusoidal tests: Force-deformation hysteresis loops

#### 2.4 実験結果

本節では、長時間ランダム波加振実験結果および正弦波加振実験 結果の説明を行う。特に本論文で提案する予測手法が正弦波置換法 に基づく予測法であるため、正弦波置換法がランダム波の特性を適 切に評価できていることを示すことが本節の目的である。詳細な結 果の考察については文献10)を参照されたい。

Fig. 5 に各ケースにおけるランダム波および正弦波加振実験によ り得られた C 点における温度時刻歴の結果を重ねて示す。そして同 様に Fig.6 にランダム波および正弦波加振実験により得られる貯蔵 剛性 K'<sub>a</sub>の時間変化と粘性係数 C<sub>a</sub>の時間変化を示す。Fig. 5 よりい ずれの加振においても,加振直後は粘弾性体のエネルギー吸収によ る発熱によってダンパー内部の温度が急激に上昇するが,ある時刻 から熱伝達・熱伝導の効果により温度上昇が緩やかになり,温度が ほぼ一定値に漸近することが確認できる。また Fig. 6 より,温度が 一定値になるに伴い貯蔵剛性 K'<sub>a</sub>と粘性係数 C<sub>a</sub>もある一定値を取る ことがわかる。加えて Fig. 5 より正弦波置換法によって適切に温度 を評価できていることが確認できる。そして同様に Fig. 6 から,様々 な振動数成分を有するランダム波とは異なり,正弦波は1つの成分 しか有してないものの,正弦波置換法によって決定した振幅と振動



Fig. 5 Random vs. sinusoidal tests: Temperature time-history

数を用いることで、置換正弦波加振時の貯蔵剛性 K'<sub>a</sub> と粘性係数 C<sub>a</sub> はランダム波加振時の結果とよく一致していることが確認できる。 ただし A-3H および A-6H において貯蔵剛性 K'<sub>a</sub> のランダム波と置 換正弦波の結果で誤差が大きいことが確認できる。これは前述した ように、風の準静的成分の影響が大きいケースにおいて、2 章 3 節 で示した貯蔵剛性の実験値の評価手法が適切でないことによるもの である。しかしそれ以外のケースについては、正弦波置換法により、 温度及び動的特性が対応良く評価されていることが確認できる。

#### 3. 動的特性簡易予測法

#### 3.1 正弦波加振時の履歴と解析モデル式

2 章より長時間振動時における粘弾性ダンパーの温度や動的特性 は一定値となることが示された。定常状態、そして定常状態になる まで過渡状態の2つに分けて考え、それぞれについて予測手法を提 案する。そしてこの2つを組み合わせることにより、動的特性を簡 易的に予測できる方法(動的特性簡易予測法)を提案する。本節で は粘弾性ダンパーを簡易的にモデル化した上で、定常状態の簡易予 測法に必要な定常状態の粘弾性ダンパーの内部温度分布式を導出す る。そしてこの式を用い、後述する手順により粘弾性ダンパーの定





常時の特性を予測する手法を提案する。

Fig.2 に示した粘弾性ダンパーをモデル化する上で,鉄板は熱伝 導率が粘弾性体に比べ,極めて大きい(約230倍)<sup>17)</sup>ため無視する。 また文献11)より粘弾性体の温度は厚み方向(z方向)に大きく依存 し、その他の方向(x,y方向)ではほとんど一定であることが示さ れているため、粘弾性体は厚み方向の一次元体として考える。そし て一次元体は,振動エネルギー入力により発熱しながら,両端から 熱伝達により熱放出を行い定常状態になるとする。Fig.7(a)に粘弾性 ダンパーで行われる熱放出の概念図を示す。また Fig.7(b)に一次元 体へのモデル化の概念図を示す。ここで定常状態となった時のそれ ぞれの面の温度を $\theta$ , $\theta$ とする。そして空気温度 $\theta_{a}$ ,熱伝導率 $\kappa$ ,熱 伝達係数 $\alpha_{cl}$ , $\alpha_{c2}$ ,単位時間単位体積当たりの内部発熱量 $\dot{Q}$ ,比熱s, 密度 $\rho$ ,モデルの長さを $d_v$ とする。ただし、一次元体における熱伝 達係数 $\alpha_{cl}$ , $\alpha_{c2}$ の導出方法の詳細は付録 Dに記載する。



 (a) Actual heat transfer occurring (b) the idealized 1D heat transfer in a VE damper (Section①)
 Fig. 7 1D model of VE damper

このようにモデル化したとき以下の3式が成り立つ<sup>17)~19)</sup>。

$$\frac{\kappa}{s\rho}\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}}{s\rho} = 0$$
(5)
$$\frac{\alpha_{c1}}{\kappa}(\theta_1 - \theta_a) - \left(\frac{\partial\theta(0)}{\partial z}\right) = 0$$
(6)

$$\frac{\alpha_{c2}}{\kappa} \left(\theta_2 - \theta_a\right) + \left(\frac{\partial \theta(d_v)}{\partial z}\right) = 0 \tag{7}$$

これらの式より一次元体の内部温度分布は以下の式で表される。なお式(5)~(7)から式(8)の導出する過程については付録 A を参照されたい。

$$\theta(z) = -\frac{1}{2} \frac{\dot{Q}}{\kappa} \left( z - \frac{\alpha_{cl}}{\dot{Q}} A \right)^2 + \frac{\alpha_{cl}^2}{2\dot{Q}\kappa} A^2 + A + \theta_a$$
(8)

ここで, Aは以下の式である。

$$A = \frac{(\alpha_{c2}d_v + 2\kappa)Qd_v}{2(\alpha_{c1}\alpha_{c2}d_v + \alpha_{c1}\kappa + \alpha_{c2}\kappa)}$$
(9)

よって、最大温度 θ<sub>max</sub> 及びその位置 z<sub>max</sub> は以下の式で表される。

$$\theta_{\max} = \frac{\alpha_{c1}^2}{2\dot{Q}\kappa} A^2 + A + \theta_a \quad (10) \qquad z_{\max} = \frac{\alpha_{c1}}{\dot{Q}} A \quad (11)$$

これらの式(9)~(11)を使い, 3.3 節にて定常状態における特性の簡易 予測手法を提案する。

#### 3.2 正弦波加振時の履歴と解析モデル式

本節では 3.3 節および 3.4 節の予測法で使用する粘弾性ダンパーの正弦波加振時の理論式および粘弾性体の温度振動数依存性を考慮できる解析モデル式<sup>14</sup>の概説を行う。

Fig.8に粘弾性ダンパーに正弦波が加振されたときの履歴を示す。

ここで $K'_d$ : 貯蔵剛性,  $C_d$ : 粘性係数,  $\eta_d$ : 損失係数,  $W_d$ : エネルギ 一吸収量,  $u_{d,\max}$ : 最大変位,  $\omega$  (=  $2\pi/T$ ): 固有円振動数である。



Fig. 8 Typical hysteresis loop under harmonic loading

このとき単位時間当たり単位体積あたりの発熱量*i*は、振動の周期 を*T*、ダンパーの体積を*V*とすると1サイクル当たりのエネルギー 吸収量*W*<sub>d</sub>をもとに次式より求められる。

$$\dot{Q} = \frac{W_d}{VT} \tag{12}$$

なおエネルギー吸収量 W<sub>d</sub> は履歴の楕円の面積で求まり,以下の式 によって算出される。

$$W_d = \pi \eta_d K'_d u^2_{d,\max} \tag{13}$$

ここで、本論文における貯蔵剛性  $K'_a$ ,損失係数 $\eta_a$ ,については粘弾 性体の温度振動数依存性を考慮することのできる分数微分モデルか ら算出している。以下にその式を示す<sup>14)</sup>。

$$K'_{d} = G \frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^{\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a^{2}\omega^{2\alpha} + 2a\omega^{\alpha} \cos(\alpha\pi/2)} \frac{A_{s}}{d_{v}}$$
(14)  
$$\eta_{d} = \frac{(-a+b)\omega^{\alpha} \sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^{\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}$$
(15)

ここでは分数微分の次数α, そして G, a, b は構成則のパラメータ <sup>(4)</sup>であり,特に a, b は温度に依存し次式で求まる<sup>20)</sup>。

$$a = a_{ref} \lambda^{\alpha} \qquad (16) \qquad b = b_{ref} \lambda^{\alpha} \qquad (17)$$

なお  $a_{ref}$ ,  $b_{ref}$ は基準温度(20°C)における a, b の値であり, また $\lambda$ は温度を考慮するシフトファクターで以下の式から求める。

$$\lambda = \exp\left[-p_1(\theta - \theta_{ref})/p_2 + \theta - \theta_{ref}\right]$$
(18)  
ここで $\theta_{ref}$ は基準温度,  $\theta$ は粘弾性ダンパーの温度を表す。

#### 3.3 SSP 手法(Steady State Prediction)

本節では、3.1節、3.2節で示した式を利用し、長時間加振時の粘 弾性ダンパーの定常状態の特性の簡易予測手法、定常時予測法 (Steady State Prediction, SSP 手法)を提案する。Fig. 9 に SSP 手法 のフロー、Fig. 10 にその概念図を示す。以下に詳しくフローの説明 をする。始めに周辺温度 $\theta_a$ で貯蔵剛性 $K'_a$ および損失係数 $\eta_a$ を式(14), (15)より算出し、そこから求まるエネルギー吸収量 $W_a$ をもとに発熱



量 $\dot{\varrho}$ を式(12)より求める。そして式(10)よりダンパー内部の最大温度  $\theta_{max}$ を算出する。次にこの温度をもとにして、貯蔵剛性 $K'_d$ および損 失係数 $\eta_d$ を再計算し、それに応じて発熱量 $\dot{\varrho}$ 、ダンパー温度 $\theta_{max}$ を 求めなおす。以上の操作をダンパー内部の最大温度 $\theta_{max}$ が収斂する まで n 回繰り返す。こうして収束した値をダンパーの定常温度 $\theta_{SSP}$ とし、この温度におけるダンパーの各特性値をダンパーの定常状態 における特性値とする。なお式(8)による定常状態におけるダンパー の内部温度分布についての検討は付録 B に記載する。

#### 3.4 SSP 手法の収斂性

本節では SSP 手法の収斂性について,2章で述べた実験を対象と し算出した予測値を用いて検討する。なおこの算出において,熱伝 達率*α*<sub>1</sub>,*α*<sub>2</sub>については次章で示す Table 3 の値を用いている。

Fig. 11 ~ Fig. 14 に SSP 手法で得られる予測温度 $\theta$ , 貯蔵剛性  $K'_a$ , 粘性係数  $C_a$  および発熱量 $\dot{q}$  の収斂回数による変化を示した図をそ れぞれ示す。

n=0における粘弾性体の貯蔵剛性  $K'_{d}$ <sup>(0</sup>は初期温度 $\theta$ <sup>(0)</sup>= $\theta_{a}$ によっ て決定されるため、大きな値で評価されていることが Fig. 12 より確 認できる。そしてそれに伴い n=0 の発熱量 $\dot{\varrho}$ <sup>(0)</sup>が高く評価されるこ とが Fig. 14 で確認され、n=1 では温度 $\theta$ <sup>(1)</sup>が高くなることが Fig. 11



からわかる。しかし次は温度 $\theta^{(1)}$ が高く評価されたことによって、粘 弾性体の貯蔵剛性  $K'_a^{(1)}$ を小さく評価するため、発熱量 $\dot{\varrho}^{(1)}$ が小さく なり、n = 2では温度 $\theta^{(2)}$ が低くなっている。そして以上のことが繰 り返され、温度 $\theta$ 、貯蔵剛性  $K'_a$ 、粘性係数 $C_a$ および発熱量 $\dot{\varrho}$ が一定 値に収束していくことが Fig. 11~Fig. 14 から確認できる。以降、本 論文では収斂回数nは以下の式の範囲に収まるまでの回数として簡 易予測手法の検討を行った。

 $0.99 \le \theta_{\max}{}^{(n)}/\theta_{\max}{}^{(n+1)} \le 1.01$  (19) このとき最も収斂回数 n が必要なケース(A-3L)において, n=6 であったため,以降はすべてのケースにおいて本手法の n = 6 の結果を示している。

#### 3.5 SDP 手法(Short Duration Prediction)

3.3 節の SSP 手法は長時間振動が加わった後の動的特性を予測で きるが、定常状態になるまでの過渡状態の特性については明らかで ない。そこで本節では、過渡状態の特性の簡易予測法、SDP 手法 (Short Duration Prediction-Method)を提案する。この手法では熱伝 導・伝達による熱放出を考慮せず、エネルギー吸収による発熱のみ を考慮して材料特性変化を考える。なおこの仮定は粘弾性体の熱導 率が小さいことを考えると、継続時間の短い場合では妥当と言える <sup>3)</sup>。Fig. 15 に SDP 手法のフロー、Fig. 16 にその概念図を示す。ただ し*j*:サイクル数である。以下にフローの詳しい説明を行う。*j*サイ クル目における温度θ<sup>00</sup>で貯蔵剛性 K'a<sup>0</sup>および損失係数ηa<sup>0</sup>を式 (14),(15)より算出し、以上の値よりエネルギー吸収量 Wa<sup>00</sup>を式(13) より求める。そして以下の式を用い、温度上昇幅Δθ<sup>00</sup>を算出する。

$$\Delta \theta^{(j)} = \frac{W_d^{(j)}}{s\rho V} \tag{20}$$

次に温度上昇幅 $\Delta \theta^{(j)}$ を用い,次サイクルの温度 $\theta^{(j+1)}$ を以下の式より 求める。



そして $\theta^{(j+1)}$ を用いて,貯蔵剛性  $K'_{a}$ <sup>(j+1)</sup>および損失係数 $\eta_{a}$ <sup>(j+1)</sup>を求め なおし,再び同じ操作を行う。以上のことを繰り返すことにより発 熱のみを考慮した場合のある時刻におけるダンパーの温度を求める ことができる。本手法で求められるj サイクル目における温度を $\theta^{(j)}$ sopとし,その温度におけるダンパーの各特性値をj サイクル目のダ ンパーの特性値とする。本節の手法で求まる温度 $\theta^{(j)}$  sopが 3.3 節の 手法で求まる温度 $\theta$  ssp を超えるまで, $\theta^{(j)}$  sop でダンパーの各特性値 を評価することで,定常状態に加え,過渡状態もダンパーの特性を 評価できる。このようにして2つの簡易予測手法を組み合わせた手 法を,動的特性簡易予測法(Simplified Prediction method of Dynamic Characteristics: SPDC)と呼ぶこととする。Fig.17 に SPDC 手法の概 念図を示す。Fig.17 のように SSP, SDP を組み合わせて SPDC としている。



#### 4. 実験結果との比較

動的特性簡易予測法 (SPDC) による予測値と実験と比較する。予 測値の算出において使用したモデルの各パラメータは、 $\alpha$ =0.558, G=0.0392 N/mm<sup>2</sup>,  $a_{ref}$ =5.6x10<sup>-3</sup>,  $b_{ref}$ =2.10,  $p_1$ =14.06,  $p_2$ =97.32,  $\theta_{ref}$ =20 °C,  $s\rho$ =0.188 N/s/°C である<sup>12)</sup>。また熱伝達係数 $\alpha_{c1}$ ,  $\alpha_{c2}$ は Table 3<sup>21)</sup>で示した値を用いている。なお熱伝達係数の決定方法につ



Fig. 18 SPDC vs. random and sinusoidal tests: temperature

いては付録 D に記載する。

Fig. 18 に、各ケースにおけるランダム波および正弦波加振実験に より得られたC点における温度時刻歴の結果とそれぞれのケースの 動的特性簡易予測法の予測値を重ねて示す。Fig. 18 より全てのケー スについて SPDC によって予測された温度は実験値と良い対応を示 していることがわかる。

同様に Fig. 19 にランダム波および正弦波加振実験により得られ る貯蔵剛性 K'<sub>a</sub>の時間変化,粘性係数 C<sub>a</sub>の時間変化とそれぞれのケ ースの SPDC による予測値を重ねて示す。ほとんどのケースにおい て動的特性簡易予測法によって精度よく動的特性が予測できている

Table 3 Equivalent heat transfer coefficients for 1D heat transfer analysis

case	$\alpha c 1 [N/s/mm/°C]$	$\alpha c 2[N/s/mm/°C]$	
A-3L	0.023	0.011	
A-3H	0.026	0.012	
A-6L	0.040	0.018	
A-6H	0.067	0.027	
C-3L	0.023	0.011	
C-3H	0.036	0.016	
C-6L	0.028	0.013	
C-6H	0.038	0.017	



Fig. 19 SPDC vs. random and sinusoidal tests: K'<sub>d</sub> and C<sub>d</sub>

ことが確認できる。一方で精度よく予測できていないケースとして ランダム波加振の A-3H が挙げられる。この誤差は風力の準静的成 分の影響によるものであることは 2.4 節にて述べた。このような準 静的成分の大きいケースにおいては付録 C で検討している。

#### 5. まとめ

本論文では,熱伝導・伝達だけでなく,粘弾性ダンパーの温度・ 振動数依存性をも考慮できる簡易評価手法(動的特性簡易予測法) を提案した。また文献 12)の長時間ランダム波加振実験結果および 正弦波加振実験結果とその手法の予測値を比較することでその精度 を確認した。以下に本論文で得られた知見を示す。

- (1) 定常状態の理論式を用いることで、長時間加振時の粘弾性ダンパーの定常状態温度及び動的特性を予測する定常時予測法 (SSP)を提案した。
- (2) 発熱のみを考慮とした粘弾性ダンパーの過渡状態の温度及び 動的特性を簡易的に予測する SDP を提案した
- (3) SSP と SDP を組み合わせることで、長時間加振時の粘弾性ダンパーの温度および動的特性を簡易的に予測する動的特性簡易予測法 (SPDC)を提案した。
- (4) 文献 12)の正弦波およびランダム波加振実験結果と SPDC によ る予測値を比較することで、長時間ランダム時における粘弾性 ダンパーの温度および動的特性を予測できていることが確認 された。

今後は本手法を用いて長時間振動時における粘弾性ダンパーの 性能低下を考慮した設計手法を構築する予定である。

#### 参考文献

- 日本建築学会:長周期地震動と超高層建物の対策案-専門家として 知っておきたいこと-,2013.10
- 2) 日本建築学会:建築物の振動に関する居住住性能評価指針,2004.5
- 日本免震構造協会:パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル 第3 版, 2013.11
- 4) 佐藤大樹,長江拓也,北村春幸,梶原浩一:長周期地震動をうける 超高層建物のオイルダンパーによる制振補強効果,日本建築学会技 術報告集,第24巻,第58号,pp.969-974,2018.10
- 5) 佐藤大樹,長山祥,笠井和彦,松田和也:長周期地震動における粘 性ダンパーの性能低下を考慮した制振構造建物の応答評価,日本建 築学会技術報告集,第24巻,第56号,pp.59-62,2018.2
- 6) 笠井和彦,佐藤大樹,松田和也,長山祥:長時間正弦波加振実験に よる4種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手 法の提案,構造工学論文集,第63号, pp.275-284, 2017.3
- 7) 佐藤大樹,島田侑,大内隼人,長江拓也,北村春幸,福山國夫,梶 原浩一,井上貴仁,中島正愛,斎藤大樹,福和伸夫:長周期地震動 を受ける超高層建物の鋼材ダンパーによる制振改修に関する E-デ ィフェンス振動台実験,日本建築学会構造系論文集,第 667 号, pp.1639-1648, 2011.9
- 8) 山田 哲,山口路夫,竹内百合,竹内徹,和田章:動的繰り返し載 荷実験結果に基づくダンパー用鋼材の履歴特性の評価,日本建築学 会構造系論文集,第 553 号, pp.121-128, 2002.3
- 9) 下村祥一,大熊武司:粘弾性ダンパーを有する木造戸建て建物の弾
   塑性風応答性状に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第632
   号, pp.1813-1821, 2008.10
- 10) 石川和久,関 雅英,曽田五月也:ジエン系ゴム粘弾性ダンパーの 繰り返し加振実験,日本建築学会大会学術講演梗概集,1999.9
- 11) 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
- 12) 佐藤大樹,所健,笠井和彦,北村春幸:風応答振動時における粘弾 性ダンパーの特性および正弦波による簡易評価手法,日本建築学会 構造系論文集,第80巻,第710号, pp.571-581, 2015.4
- Dave M Osabel, Daiki Sato, Kazuhiko Kasai:Full-Scale Viscoelastic Damper under Long-Duration Loading, Experiment and Performance Evaluation, Workshop for Young Researchers, Feb. 13.2020

- 14) 笠井和彦,寺本道彦,大熊潔,所健:粘弾性体の温度・振動数・振 幅依存性を考慮した構成測(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
- 15) 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,構造工学論文集,第 53 号, pp.67-74, 2007.3
- 16) 大木洋司,笠井和彦,高橋治:微小振幅における速度依存型ダンパ ーの性能について,構造工学論文集,第50巻,pp.601-609,2004.3
- 17) 西川兼康,北山直方:図解伝熱工学の学び方,オーム社,1982.1.20
   18) スタンリー・ファーロウ:偏微分方程式 科学者・技術者のための
- 使い方と解き方,朝倉書店,1983.9.10
- 19) 金子晃:偏微分方程式入門,東京大学出版会, 1998.2.5
- 20) 笠井和彦,所健:寺本道彦,大熊潔,所健:粘弾性体の温度・振動 数・振幅依存性を考慮した構成測(その2温度上昇および歪・歪速 度がもたらす非線形のモデル化),日本建築学会構造系論文集,第 561号, pp.55-63, 2003.7
- 21) Dave M Osabel, Daiki Sato, Kazuhiko Kasai:Numerical Analysis of a Viscoelastic Damper under Long-Duration Random Loading, The 7th Asia Conference on Earthquake Engineering, 22-25 November 2018
- 22) ABAQUS Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc;1997.
- 23) 吉江慶祐,大熊武司,北村春幸,和田章:広帯域性の変動風力を受ける弾塑性構造物の応答変位振幅の確率分布,日本建築学会構造系 論文集,第604号,pp.37-46,2006.6

#### 付録 A 熱伝導方程式の導出と精度

本付録では式(5)~(7)より式(8)を導出する過程を示す。そして三次元熱伝導解析ソフト ABAQUS ver. 2017<sup>22)</sup>(以下, ABAQUS とする)による熱伝導解析を行い,精度を確認する。以下に導出過程を詳しく述べる。

式(5)を2回積分してθについて整理すると次式が得られる。

$$\theta(z) = -\frac{1}{2}\frac{Q}{\kappa}z^2 + \frac{C_1}{\kappa}z + \frac{C_2}{\kappa}$$
(A-1)

ここで $C_1$ ,  $C_2$ は積分定数である。

一方,定常状態において,z=0, $z=d_v$ での温度は $\theta_1$ , $\theta_2$ であるので次式が成立する。

$$\theta(0) = \theta_1 \tag{A-2}$$

$$\theta(d_v) = \theta_2 \tag{A-3}$$

よって $C_1$ ,  $C_2$ は次式で求められる。

$$C_1 = \frac{\kappa}{d_v} \left( \theta_2 - \theta_1 \right) + \frac{1}{2} \dot{Q} d_v \tag{A-4}$$

$$C_2 = \kappa \theta_1 \tag{A-5}$$

式(A-4), (A-5)を式(A-1)に代入することで次式が得られる。

$$\theta(z) = -\frac{1}{2}\frac{\dot{Q}}{\kappa}z^2 + \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{d_\nu} + \frac{1}{2}\frac{\dot{Q}}{\kappa}d_\nu\right)z + \theta_1$$
(A-6)

上式をzについて偏微分すると以下の式が成立する。

$$\frac{\partial \theta(0)}{\partial z} = \frac{1}{d_v} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} \frac{\dot{Q}}{\kappa} d_v$$
(A-7)

$$\frac{\partial \theta(d_v)}{\partial z} = \frac{1}{d_v} (\theta_2 - \theta_1) - \frac{1}{2} \frac{\dot{Q}}{\kappa} d_v$$
(A-8)

これらを式(6)、(7)に代入して整理すると次式が成立する。

$$\frac{\alpha_{c1}}{\kappa} (\theta_1 - \theta_a) = \frac{1}{d_v} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} \frac{Q}{\kappa} d_v$$
(A-9)

$$\frac{\alpha_{c2}}{\kappa} \left(\theta_2 - \theta_a\right) = -\frac{1}{d_v} \left(\theta_2 - \theta_1\right) + \frac{1}{2} \frac{\dot{Q}}{\kappa} d_v \tag{A-10}$$

そして式(A-9),式(A-10)を解くと以下が求められる。  $\theta_1 = A + \theta_a$  (A-11)

ここでAは次式である。
$$(r_{1}, d_{2}, r_{2})$$

$$A = \frac{(a_{c2}a_v + 2\kappa)2a_v}{2(\alpha_{c1}\alpha_{c2}d_v + \alpha_{c1}\kappa + \alpha_{c2}\kappa)}$$
(A-12)

式(A-11)を用い式(A-6)を整理すると最終的に次式が得られる。

$$\theta(z) = -\frac{1}{2} \frac{Q}{\kappa} z^2 + \frac{\alpha_{cl}}{\kappa} A z + A + \theta_a$$
(A-13)

そして式(A-13)を整理すると式(8)が簡単に得られる。

ー例として実際に式(A-13)より, Excel を用いて数値を算出する。 ここで熱伝導率 $\lambda$ =0.45 W/m/K,  $d_v$ =3 mm,  $\theta_0$ =25 °C,  $\theta_a$ =10 °C, 熱伝達係数  $\alpha_{cl}$ =200 W/m<sup>2</sup>/K,  $\alpha_{c2}$ =1000 W/m<sup>2</sup>/K, 内部発熱量 $\dot{Q}$ =5000 kw/m<sup>3</sup> とした。そして同じ条件を用いて三次元熱伝導解析ソ フト ABAQUS による熱伝導解析を行い,その結果と比較した。三次 元熱伝導解析ソフト ABAQUS 上のモデルの詳細を Fig.A-1 に示す。 このモデルで定圧比熱 *s*=430 ws/kg/K, 密度 $\rho$ =7800 kg/m<sup>3</sup> としてい る。Fig.A-2 に算出した定常状態における温度分布図に解析値をプロ ットして示す。このグラフより 2 つが良く一致していることが確認 できる。



付録 B SSP による内部温度分布と実験値の比較

SSP において式(8)より,定常温度における内部温度分布を把握す ることができる。付録 B では2章で概説した実験結果と内部温度分 布の予測値を比較して,その精度を検討する。Fig.B-1 に風方向およ び風直交方向の各ケースの定常状態において予測される内部温度分 布 (SSP) にランダム波加振実験 (Ran) と置換正弦波加振実験 (Sin) における点 B と点 C の計測値をプロットした図を示す。どのケース でも,各位置の温度を,SSP 手法によって精度よく求められている ことが確認できる。



付録 C 準静的成分の影響の大きいケースにおける貯蔵剛性の評価

風方向には風力の準静的成分が多く含まれるため、風方向のダン パー変位にも準静的成分が多く含まれた波形となる。さらに準静的 成分は建物の減衰によってほとんど変化しない値であるため、固有 振動数成分の少ない減衰の高い建物でのダンパー変位には相対的に 多く含まれることになる。その結果、風方向でかつ減衰の高い A-3H や A-6H のようなケースでは風の準静的成分の影響が大きくなる。 そしてそのような風の準静的成分の影響が大きいケースにおいては、 2.3 節で説明した方法では適切に実験時の貯蔵剛性を評価できない ことが確認された (Fig. 4)。これは、静的な力の性質を持つ準静的 成分により履歴の中心位置が移動するため、式(3)の評価手法では実 際の履歴の傾きより小さく算出されてしまうことが原因であった。 そこで本付録では、そのようなケースにおいての実験時の貯蔵剛性 の評価方法を再度検討する。そして、置換正弦波加振実験結果およ び動的特性簡易予測法 (SPDC) による予測値と比較することで、改 めて、2 つの手法(正弦波置換法. SPDC)の精度を確認する。 Fig.C-1(a)に A-3H のランダム波実験で得られた 3600 秒から 90 秒間の履歴を示す。Fig.C-1(a)のランダム波実験の履歴をみると履歴の中心位置が移動していることが確認できる。これは上述した通り、準静的成分が多く含まれることに起因する。この影響により、風方向でかつ減衰の高い A-3H におけるランダム波実験の履歴から式(3)より貯蔵剛性を評価すると、実際のループの傾き(図中 $\overline{K'_d}$ )より値が低く評価さてしまう(図中 $K'_d$ )。

以下に新たな貯蔵剛性の実験値の評価手法を説明する。はじめに Fig.C-1(b)に示すように、計測した履歴(All loop)を $F_d > 0$ が計測さ れてから次に $F_d < 0$ が計測される手前までと、 $F_d < 0$ が計測されて から次に F<sub>d</sub>>0 が計測される手前までに分解する。なお、以降この 分解された各履歴を半ループ(Half-cycle loop)と呼ぶ。そして各半 ループにおいて式(3)より貯蔵剛性を求め、その平均を取る。こうし て求めた貯蔵剛性を準静的成分の大きいケースにおける実験値とし、  $\overline{K}$ と表すことにする。つまり半ループの数を m とし、それぞれに おける貯蔵剛性の値を $K'_{d}$ <sup>(m)</sup>とすると、 $\overline{K'}_{d}$ は以下の式より求まる。  $\overline{K'_d} = \sum K'_d^{(m)} / m$ (C-1) ただし, K'<sub>d</sub><sup>(m)</sup>を求める際, Fig. C-1(b)に示すように半ループについ てそれぞれ点対象の履歴を作成して組み合わせた上で式(3)より算 出していることに注意する。これは最小二乗法の数学的性質上、半 分の履歴から傾きを求めることができないことによるものである。 Fig. C-1(a)に A-3H のランダム波実験で得られた 3600 秒から 90 秒間 の履歴に Fig. C-1(c)に式(3)より評価した貯蔵剛性 K' およびと式(C-1)より評価した貯蔵剛性 $\overline{K'_d}$ を示す。式(C-1)より実際の計測した履 歴に対して適切な傾きを持った値で貯蔵剛性を評価できていること が確認できる。そして、Fig.C-1(c)に式(3)より評価した貯蔵剛性 (Test Al) と式(C-1)より評価した貯蔵剛性(Test half) を合わせて

示す。他の時刻における履歴についても同様に、式(C-1)より計画でついても同様に、式(C-1)より、貯蔵 剛性が実際の履歴の傾きより過小評価されることなく適切に評価で きていることが確認できる。



以上の方法は風の準静的成分の影響が大きい場合においても適切に履歴の傾きを評価できるが、煩雑な手間を有する。そこで本付録では加えて、その傾きをより簡便に評価する方法を以降に検討する。A-3Hのランダム波実験の履歴に対して、周期成分のうち固有振動数  $f_0$  (= 1/ $T_0$ )の 1/3<sup>23</sup>より高周期成分のみを取り出して、式(3)により貯蔵剛性を評価する。なお、以降においては、低周期である準静的成分を Qs (Quasi-Static)、高周期である共振成分を Dy (Dynamic)、全成分を Al (All) という添え字で表す。

Fig. C-2 に A-3H のランダム波加振実験の 3600 秒から 90 秒間に おけるダンパー荷重のパワースペクトルを示す。Fig. C-3 に共振成 分のみの履歴を示す。Fig. C-1(a)と比較して振動中心が移動していな いことがわかる。そこでFig. C-3 で示すような履歴において,式(3) より貯蔵剛性を評価する。Fig. C-1(c)に共振成分のみにより求まる貯 蔵剛性(Test\_Dy)を式(3)より評価した貯蔵剛性(Test\_Al)および式 (C-1)より評価した貯蔵剛性(Test\_half)と合わせて示す。Test\_half と Test\_Dyを比較すると、精度よく一致していることが確認できる。つ まり共振成分のみで、準静的成分の影響が大きい場合における貯蔵 剛性の値を適切に評価することが可能であることがわかる。



Fig. C-4 に A-3H と A-6H における SPDC よる予測値,共振成分の 実験値(Test\_Dy)および置換正弦波加振実験結果(sin)を合わせて 示す。実験値の評価方法を修正した結果、SPDC により精度よく貯 蔵剛性の値を予測できていることが確認できる。また正弦波置換法 によりランダム波の特性を適切に考慮できていることが確認できる。



Fig.C-4 SPDC vs. random vs. sinusoidal tests: K<sub>d</sub>'

#### 付録 D 熱伝達係数の決定方法

Table3 の熱伝達係数の決定方法について概説する。詳細は文献 21) を参照されたい。本論文の検討において熱伝達係数 $\alpha_{c1}$ ,  $\alpha_{c2}$ は Fig.D-1 に示す三次元 FEM モデルを使った ABAQUS による熱伝導解析の 結果を用い,以下の式より導出している。

$$\alpha_{c1} = \left(Q_{out} / A_c\right) / \left(\theta_{out} / \theta_a\right)$$
(D-1)

$$\alpha_{c2} = (Q_{in}/A_c)/(\theta_{in}/\theta_a)$$
(D-2)

ただし Qour, Qinは、それぞれ三次元 FEM モデルの粘弾性ダンパー の外板,中央の内板から放出される熱量であり、Acは板それぞれの 面積である。また θour, θinは、それぞれ三次元 FEM モデルの粘弾性 ダンパーの外板,中央の内板の表面の平均温度であり、θaは空気温 度を表す。Fig.D-2 に一例として A-3L の入力波を受けたときの三次 元 FEM モデルの粘弾性ダンパーの定常熱伝導解析の結果を示す。 なお、ここでは対称性を考え Fig.D-1 に示したダンパーモデルを縦 に半分、横に半分にした四等分のモデルを使用している。この三次 元 FEM モデルの定常熱伝導解析の結果と式(D-1)、式(D-2)により本 論文の手法で用いられる A-3L における熱伝達係数が決定される。

