

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	高層建物の制振を対象とした風洞実験装置の開発および風応答に関する基礎的研究：粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建築物の一様流中における風洞実験
Title	DEVELOPMENT OF WIND TUNNEL TEST SYSTEM CONSIDERING PASSIVE CONTROL OF TALL BUILDING AND FUNDAMENTAL STUDY ON WIND RESPONSE Wind tunnel tests of tall building having viscous or visco-elastic damper under uniform flow
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	日本建築学会構造系論文集, , No. 609, pp. 65-73
Citation(English)	Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), , No. 609, pp. 65-73
発行日 / Pub. date	2006, 11
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: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110004837159">http://ci.nii.ac.jp/naid/110004837159</a>

# 高層建物の制振を対象とした風洞実験装置の開発および 風応答に関する基礎的研究

—粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建築物の一様流中における風洞実験—

## DEVELOPMENT OF WIND TUNNEL TEST SYSTEM CONSIDERING PASSIVE CONTROL OF TALL BUILDING AND FUNDAMENTAL STUDY ON WIND RESPONSE

—Wind tunnel tests of tall building having viscous or visco-elastic damper under uniform flow—

佐藤大樹\*, 笠井和彦\*\*, 田村哲郎\*\*\*

*Daiki SATO, Kazuhiko KASAI and Tetsuro TAMURA*

In this paper, the wind tunnel test method for a building with either viscous damper or visco-elastic damper is developed. The test set-up includes a special measurement system to obtain the damper hysteresis loop, which is extremely useful to understand the dynamic characteristics of the damper and the system. The damper and system responses obtained from the free vibration tests and the wind tunnel tests using uniform flow are discussed. Three-dimensional heat transfer analysis and static analysis using the same finite element model of the visco-elastic damper are performed in order to estimate the temperature distribution of the visco-elastic damper under the wind loading.

**Keywords :** passive control, viscous damper, visco-elastic damper, wind tunnel tests, finite element analysis, heat transfer

パッシブ制振, 粘性ダンパー, 粘弾性ダンパー, 風洞実験, 有限要素解析, 熱伝達

### 1. はじめに

#### 1.1 背景および温度制御型実験法の提案

近年、高層建築物の地震および強風時の安全性や日常吹く風に対する居住性を向上させるため、ダンパーを設置する制振構造が注目されている<sup>1)2)</sup>。なかでも、粘弾性ダンパーは幅広い振幅や振動数で適用可能であるため、地震だけでなく風に対しても、同一のダンパーで有効に作用する特性をもつ<sup>3)</sup>。しかし、粘弾性ダンパーは振動数依存性や温度依存性を有し、振動時にはエネルギー吸収による発熱のためダンパーの剛性やエネルギー吸収能力が低下し、ダンパー特性が変化する<sup>4)</sup>。そのため、粘弾性ダンパーを風応答の制振に用いる場合にはダンパー特性の変化に注意する必要がある。

長時間の外乱が作用した場合の、粘弾性ダンパーの特性変化の解析的な予測手法は笠井ら<sup>5)</sup>により提案されている。しかし、建物全体として振動依存風力を考慮した応答特性を把握するためには、空力振動モデルによる風洞実験を行う必要がある<sup>6)</sup>。これまでの風洞実験では、ダンパーによる制振効果を期待した建物であっても、建物の固有振動数や減衰定数が、各種ダンパー個々の動特性により変化することを考慮せずに、一定の振動数や減衰定数などを用いて応答を評価してきた。しかし、粘弾性ダンパーを用いる場合には、振動数や温度に対する依存性、温度上昇によるダンパーの特性の変化などが、建物全体の風応答に与える影響を考慮した実験を行い、応答を評価する必要がある。Choら<sup>7)</sup>は、粘弾性ダンパーを空力振動モデルに設置して行った風洞実験を行い、粘弾性ダンパーの風応答に対する制振効果を報告している。しかし、風応答時のダンパーの履歴

および温度が得られていないため、風応答時のダンパー特性や変化がシステムの応答に与える影響について明らかにしていない。

空力振動モデルによる風洞実験は、実建物に比べて高振動数での実験が多く<sup>6)</sup>、その場合、振動数依存性を有する粘弾性ダンパーでは実現象と異なるダンパー特性での実験となる。また、ダンパーの温度は発熱量、熱伝導・伝達により決定され、それらは振動数、振幅、ダンパーの形状や材料、さらには周辺温度によって異なってくる<sup>8)</sup>。そのため、実建物で使用されるダンパーと同じ材料を風洞実験で用いる場合は、比熱や密度、熱伝導係数は材料値で規定されるため、発熱量および熱伝導・伝達をスケールの違いから実験で相似させることは困難である。

ここでは、実建物のダンパー特性の変化を風洞実験で再現するために、振動数と温度のダンパー特性に対する相似性を活用しながら、ダンパーと周辺の温度差による熱伝達の効果を変化させて温度制御する実験手法を提案する。なお、本手法は、応答レベルと温度上昇を反復手法で決定することで、粘弾性ダンパーの温度上昇を考慮した実建物の強風時における応答挙動が推定できることになる。

#### 1.2 本論文の目的および概要

本論文では、ダンパー特性が風応答に及ぼす影響を明らかにするとともに、上述した粘弾性体の温度上昇による特性変化を考慮した風洞実験手法を確立する第一段階として、ダンパー特性を温度により制御する実験手法を提示し、シリコンオイル（粘性ダンパー）の実験値と有限要素解析との比較から精度を検討することを目的とする。はじめに、風応答時のダンパー履歴を計測できる風洞実験装置

\* 東京工業大学 大学院生

\*\* 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph. D.

\*\*\* 東京工業大学環境理工学創造専攻 教授・工博

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

Prof., Struct'l Eng. Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.

Prof., Dept. of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

の概要を述べる。振動時のダンパー履歴が得られれば、定常振動時の理論<sup>2)</sup>に基づき、実験装置の精度および応答特性を明らかにすることが可能となる。自由振動試験結果より、ダンパーおよびシステム特性の算出方法を提案し、試験装置の精度を検証する。さらに風洞実験において、一樣流の渦励振時には応答が定常的となることを利用し、ダンパー履歴から、ダンパーおよびシステムの応答特性を評価する。また、一定のダンパー特性となるように温度上昇を制御した粘弾性ダンパーでの風洞実験と、粘性ダンパーの風洞実験との比較により、温度制御手法の精度検証を行う。最後に、振動時の粘弾性ダンパー内部には温度分布を有することが予想されるため、有限要素法による3次元熱伝導解析<sup>3)</sup>を行い、粘弾性ダンパーの温度計測・制御法についての妥当性を検証する。

## 2. 風洞実験装置の概要および計測方法

### 2.1 試験装置および風洞の概要

本研究では、層ごとにダンパーをもつ建物が直線の1次モードの変形を示すと仮定することで、各層における架構部分、ダンパー部分それぞれの力学的特性を集約的に模擬したコイルバネと、ダンパーにより、建物模型がピボットを中心にロッキング振動する風洞実験装置を製作した。ダンパーは粘性および粘弾性ダンパーの2種を対象とし、それぞれを粘性システム、粘弾性システムと呼ぶ(図1)。建物模型の部は、幅  $B=50\text{ mm}$ 、奥行き  $D=50\text{ mm}$ 、高さ  $H=300\text{ mm}$  で、辺長比  $B/D=1$ 、アスペクト比  $H/B=6$  のパルサ材を用いた。振動の自由度は、風直角  $Y$  方向のみである。建物模型の振動との共振を避けるため、風洞実験装置は十分な剛性を有する。

粘性ダンパーは、建物模型の真下に設置され(図1(a))、円盤が建物模型のロッキングに伴いシリコンオイルの入ったシャーレ内を移動する際に、ダンパー力を発生する。粘性システムの減衰定数  $\xi_{eq}$  は、シャーレ内のシリコンオイルの量および動粘度(3,000 ~ 10,000 mm/s, 25°C)を変えて調節する。後述するように、本シリコンオイルの温度依存性は、粘弾性体と対比して無視できるものである。

粘弾性ダンパーは、厚さ 3mm のアルミ板(上板、下板)の間に幅、奥行き、高さ ( $B_d, D_d, H_d$ ) = 3mm, 5mm, 8mm の粘弾性体(住友スリーエム:ISD112)が挟まれた形状となっている(図1(a), (d))。上板は連結板を介してコイルバネと同じ高さ、支持棒から 42mm ずれた位置に設置される(図1(b)~(d))。模型のロッキング振動に伴い回転運動するダンパー上板によって、粘弾性体に変形が生じ、ダンパー力を発生する。その際のダンパー上板の回転運動による  $Z$  方向変位は、最大水平変位に対し 2%と十分に小さい。一般に、空力振動模型による風洞実験では実建物の振動数に比べ高い振動数で行う場合が多い。その場合、振動数が高いほど粘弾性体の剛性は高くなるため、実建物に用いた場合の剛性とは異なる。そこで、低めの振動数での粘弾性体の材料特性を再現するには、高温にすればよいという「温度・振動数等価性」<sup>4)</sup>を利用し、粘弾性体を温めることで高振動数においても等価なダンパー特性を得ることにする。つまり、粘弾性システムの減衰定数  $\xi_{eq}$  は、粘弾性体の温度を変更して調節する。粘弾性体温度が高くなるほど、コイルバネに対する相対的な剛性が低くなるため、システムに対するダンパーの寄与ひいては  $\xi_{eq}$  が小さくなる。粘弾性体の温度は実験装置内におかれた2個の電球(図1(c))の電力を調節して制御する。粘弾性システムの実験装置は保温のためナイロン袋で覆われている。

風洞は東京工業大学所有の吹き出し式エッフェル型風洞を用いた。測定断面は 1.0m x 0.8m、測定部長さは 7.0m である。建物模型の上

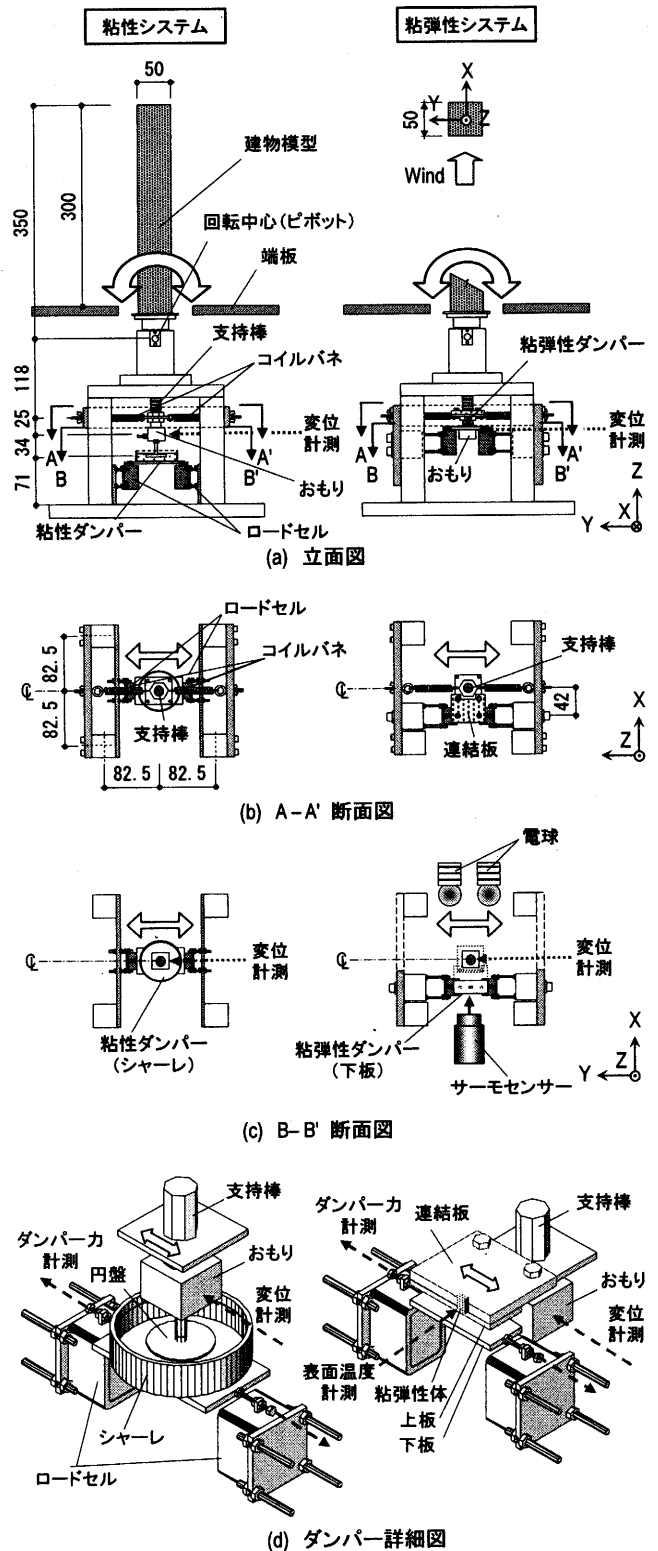


図1 風洞実験装置(単位:mm)

流 500mm の位置から風洞出口まで端板を設置し(図1(a))、風洞床面近傍に生じる境界層を避けている。なお、風洞床面から端板の高さは 135mm であり、その時の模型を含めた閉塞率<sup>5)</sup>は 2.26% である。

### 2.2 計測方法

粘性システムの場合の変位計測は、図1(a), (c)に示すおもりの位置(以後、変位計測位置)でレーザー式変位計により行った。また、粘弾性システムの場合の変位計測も、図1(a), (c), (d)に示すように粘性システムと同じ位置でレーザー式変位計により行った。

粘性ダンパーの変形は円盤の変位、粘弾性ダンパーの変位は上板の変位と定義し(図1(d))、それぞれを変位計測位置での計測値から、幾何学的関係を用いて算出した。また、粘性ダンパーのダンパー力は、シャーレを固定したアルミ底板の両側に締結した2つのロードセルで計測し、粘弾性ダンパーのダンパー力も同様に、下板に締結した2つのロードセルで計測を行った。(図1(d))。

以上、本試験装置はダンパー変位だけでなくダンパー力を計測できるため、風応答時の履歴を得ることができ、ダンパーやシステムの応答特性やその変化の把握に大変有効な情報を与える。

粘弾性体は変形にともない仕事を熱へと変換するため、振動時には粘弾性体内部の温度が上昇する。その検討のため、熱電対による内部温度計測がよく行われるが、本研究で用いた粘弾性体が非常に小さく、そのような方法は不可能であった。一方で、本ダンパーが空気に接する表面積が相対的に大きく、かつ、幅  $B_d$  も3mmと薄いため、粘弾性内部の発生熱は空気中に伝達されやすいと仮定し、表面温度をサーモセンサーによって計測し(図1(c))、それを内部温度と見なした。本ダンパーの形状のため表面温度と内部温度がほぼ等しいという関係は、3次元有限要素解析により検証した(第5章、後述)。ダンパー周辺の温度は熱電対によって計測した。

平均流速は模型頂部高さに設置したピトー静圧管で計測した。模型後流の渦発生周波数  $f_t$  は、模型中心から風下に  $6B$ 、風直角方向に  $2B$ 、端板から  $2H/3$  の位置にI型熱線流速計を設置し、計測した変動流速の、パワースペクトル密度のピーク周波数より求めた。

サンプリング周波数は2,500Hzとした。これは、非制振システム(後述)の固有振動数  $f_0$  の約140倍である。各実験の計測時間は実物換算で600秒の波形が5波以上得られる52.4288秒とした<sup>6)</sup>。振動数・速度依存のダンパーの実験では、フィルター操作によって各データの位相ズレが生じることは防がなければならない。本試験では、計測時にはフィルターおよび平滑化の操作は行わず、試験後に付録Aに示す手法でノイズの除去を行った。

### 3. 自由振動試験

#### 3.1 目的および試験方法

自由振動試験を各ケースの風洞実験の前後に行った。風洞実験前の試験では、システムの減衰定数の決定およびダンパー特性(3.3節)を得ることが目的である。また、風洞実験後の試験では、風洞実験前のダンパー特性と比べてダンパー損傷の有無を確認することが目的である。これら自由振動試験は、粘弾性体の内部と表面の温度が均一となるように、少なくとも5分間は表面温度を一定に保持した後に行う。粘性・粘弾性システムともに自由振動試験は各3回行い、バラツキがないことを確認した。

非制振システム、つまり粘性および粘弾性ダンパーを設置していない風洞実験模型を以下の状態とする定義する。粘性システムではシリコンオイルの入っていない状態とし、粘弾性システムでは、粘弾性体が無いダンパー上板のみをつけた状態とする。

自由振動より求める非制振システムの固有振動数  $f_0$  が粘性、粘弾性システムとも  $f_0 = 17.80$  Hz となるように、変位計測位置にそれぞれ特定の重量を付加して調節する。非制振システムの減衰定数  $\xi_0$  は、粘性、粘弾性システムともに0.2%であった。

#### 3.2 自由振動試験結果

図2(a), (b)は自由振動試験から得られた粘性ダンパーのダンパー変形  $u_d$ -ダンパー力  $F_d$  の履歴、図2(c), (d)は粘弾性ダンパーの履歴である。各ダンパーでシステムの減衰定数  $\xi_{eq} = 1\%$ ,  $2\%$  の2つケース

の結果を示す。比較のため粘性ダンパーの履歴は粘弾性ダンパーと同じ高さ(図1(a))に換算した等価履歴を示している(式(4)、後述)。また、図中の破線は自由振動の履歴から求めた、ダンパーの貯蔵剛性  $K'_{df}$  (式(1a)、後述)、黒丸は変形の最大・最小の点を表す。

図2(a), (b)より、粘性ダンパーの履歴においても若干の傾き(剛性)があることが確認された。粘性ダンパーのシリコンまた、図2(c), (d)の粘弾性ダンパーの履歴は粘性ダンパーより顕著な剛性を示し、 $\xi_{eq} = 2\%$  の履歴(図2(d))の剛性は粘弾性体の表面温度が低いため(31.0°C)、 $\xi_{eq} = 1\%$  の履歴(図2(c))の43.5°Cにおける剛性より高い値となっており、粘弾性体の特性が捉えられている。なお、自由振動は振動時間が短いため粘弾性体の温度は上昇しておらず、よって、自由振動試験は、ダンパー内部の温度が均一の状態におけるダンパー特性を与える。

次に、システムの減衰定数  $\xi_{eq}$  と固有振動数  $f_{eq}$  の変化における関係性を確認する。粘弾性システムの減衰定数  $\xi_{eq} = 0.8\%$  のケースでは、剛性を持つ粘弾性ダンパーを設置したことにより、非制振システムの固有振動数  $f_0$  (3.1節) に対し  $f_{eq}$  は0.85%高かった。粘弾性体の温度を低下させた  $\xi_{eq} = 2\%$  のケースでは、粘弾性ダンパーの剛性が高くなるため、 $f_{eq}$  は  $f_0$  より1.18%高かった。粘性ダンパーも若干の剛性を有するものの(図2(a), (b))、システム全体への寄与は小さく、 $f_{eq}$  は  $\xi_{eq}$  の値に関わらず  $f_0$  とほぼ等しかった。

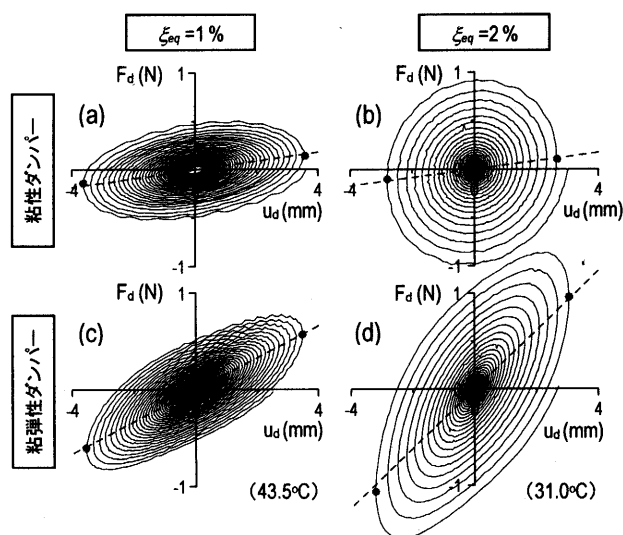


図2 自由振動時の履歴(コイルパネ位置): (a),(b)粘性ダンパー, (c),(d)粘弾性ダンパー

#### 3.3 ダンパー特性の評価

ダンパーがシステムに与える影響を具体的に検討するためには、ダンパー履歴からダンパー特性を精度良く算定することが重要である。一般には、ダンパー単体での正弦波による定常加振試験を行い、得られた履歴をもとにダンパー特性を評価することが多いが、本論文では風洞実験前に行われる自由振動試験時のダンパー履歴を用いて、ダンパー特性を算定する方法を提案する。ここでは、粘性ダンパーが剛性を有することが確認されたため、粘性ダンパーについても粘弾性ダンパーと同様の手法でダンパー特性を算定する。

図3は定常状態での履歴である。 $K'_d$ はダンパーの貯蔵剛性、 $\eta_d$ はダンパーの損失係数と呼ばれ、それぞれ楕円の傾きと太さの程度を表す<sup>2)</sup>。 $K'_d$ は、各ステップ  $i$  での実験値  $F_d^{(i)}$  と  $u_d^{(i)}$  を用いて式(1a)より算出される<sup>3)</sup>。また、 $\eta_d$ は  $K'_d$  を用いて式(1b)より得られる。

$$K'_d = \frac{n \sum F_d^{(i)} u_d^{(i)} - \sum F_d^{(i)} \sum u_d^{(i)}}{n \sum (u_d^{(i)})^2 - (\sum u_d^{(i)})^2}, \quad \eta_d = \frac{E_D}{\pi K'_d (u_{d,max})^2} \quad (1a,b)$$

ここに、 $\Sigma$ は総和記号であり1サイクル中でそれぞれ  $n$  個の  $F_d^{(i)}, u_d^{(i)}$  を対象とする。 $E_D$ は1サイクル当たりのダンパーの吸収エネルギーを表し、履歴の面積より得られる。 $u_{d,max}$ はダンパー最大変形である。

一方、自由振動時の1サイクルの履歴は、図2からも分かるように、時々刻々と変位および荷重が減衰するため、図3のような閉ループとならず、図4の実線のように  $\overline{OA} > \overline{OB}$  となる。よって、式(1)をそのまま用いては大きな誤差が生じるため、図4破線の如く  $\overline{OA'} = \overline{OB'}$  となるよう半サイクル(半波)の履歴を  $u_d$  軸と平行に移動し、さらにそれを原点  $O$  で点対称に回転させたものと合わせることで閉ループを得ることができる。この閉ループを用いて、式(1)より半波毎の  $K'_d$  および  $\eta_d$  を求める。

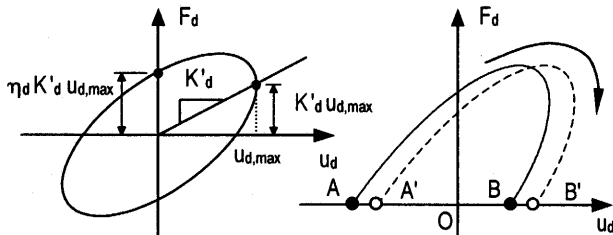


図3 定常状態での履歴 図4 自由振動時の半サイクルの履歴

粘弾性ダンパーから求めた  $K'_d, \eta_d$  の代表例を図5(a), (b)に示す。図5より、振幅による  $K'_d$  と  $\eta_d$  の変化は殆どなく、少なくとも、ここで対象とした振幅レベルでは、振幅依存性が無いことを確認した。また、表面温度が  $30^\circ\text{C}$  から  $50^\circ\text{C}$  に上昇した時、 $K'_d$  と  $\eta_d$  はそれぞれ 0.37倍、0.68倍となった。

図2の破線は式(1a)より求めた  $K'_{df}$  である。以後、自由振動より求めた値には、添え字 ' $f$ ' を付けることとする。図2(a), (b)における粘性ダンパー、図2(c), (d)における粘弾性ダンパーともに  $K'_{df}$  を示す破線は、変形の最大・最小点を示す黒丸とほぼ一致している。よって定常状態(図3)における手法を自由振動(図4)に拡張した上記手法が、自由振動履歴から精度良く貯蔵剛性を評価できることを確認した。

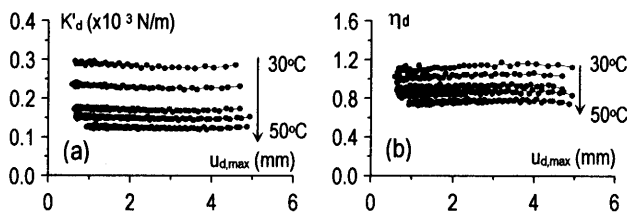


図5 温度、振幅によるダンパー特性の変化:(a)  $K'_d$ , (b)  $\eta_d$  (上から順に  $30^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $45^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ )

また、粘性ダンパーの特性値として用いられる粘性係数  $C_d$  は、ダンパーの履歴と式(1)から求めた  $K'_d, \eta_d$  を用い、次式で算出できる<sup>9)</sup>。

$$C_d = \eta_d K'_d / (2\pi f_{eq}) \quad (2)$$

図6は、粘性ダンパーの自由振動試験より、式(1), (2)を用いて算出した半サイクル毎の  $C_d$  をプロットした例である。本装置のような粘性ダンパーの場合、シャーレ底面と円盤の距離や振幅によって履歴特性に振幅依存性が生じる場合があるが、本試験における  $C_d$  は振幅によらずほぼ一定であり(図6)、粘性ダンパーについても振幅依

存性が無いことを確認した。

図7は粘性ダンパーの変位波形を微分して求めたダンパー速度  $\dot{u}_d$  と、ダンパー力  $F_d$  の関係をプロットしたものである。図中の破線は式(1), (2)より求めた  $C_d$  であり、プロットと破線が良く一致していることから、自由振動の履歴においても、 $C_d$  が精度良く評価できることを確認した。また、プロットは  $C_d$  の破線上に分布していることから、速度に比例した力を発生する、線形の粘性ダンパーであることも確認された。なお、実験に用いた全てのケースについて、振幅依存性が無いこと、およびダンパーの線形性を確認している。

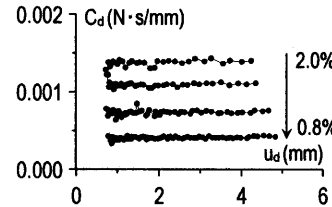


図6  $C_d$  の振幅依存性の確認 (上から  $\xi_{eq} = 2.0\%$ ,  $1.6\%$ ,  $1.2\%$ ,  $0.8\%$ )

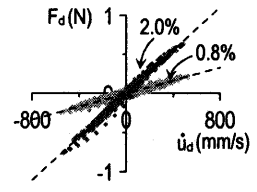


図7  $C_d$  の線形性の確認 ( $\xi_{eq} = 2.0\%$ ,  $0.8\%$ )

### 3. 4 システム特性の評価

粘性、粘弾性ダンパーの自由振動試験から得たダンパー位置での  $K'_d, \eta_d$  と、定常振動時の理論式を組み合わせることで、システムの固有振動数  $f'_{eq}$  および減衰定数  $\xi'_{eq}$  を算出する。本試験装置では、粘弾性ダンパーがコイルバネと同じ高さに設置されているが、粘性ダンパーはコイルバネと異なる高さに設置されている(図1(a))。ここでは、一般式として、ダンパーとコイルバネの位置が異なる場合での定式化を行う。

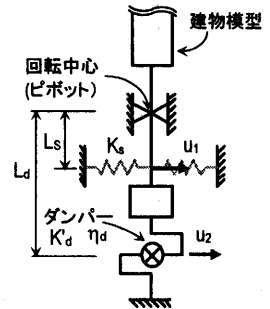


図8 試験装置概念図

また、ピボットや他の部分での摩擦は無いものとし、ダンパー部以外の治具などは剛と仮定する。

図8に本試験装置の概念図を示す。 $K_s$ はコイルバネ2本分の剛性(=  $9.42\text{ N/mm}$ )、添え字 ' $1$ ' はコイルバネの位置、' $2$ ' はダンパー位置を表す。 $L_s$ はピボットからコイルバネまでの距離(=  $118\text{ mm}$ , 図1(a)),  $L_d$ はピボットからダンパーまでの距離(粘性ダンパー:  $177\text{ mm}$ , 粘弾性ダンパー:  $118\text{ mm}$ ) である。

ダンパー位置に  $u_2(t) = u_{20} \sin \omega t$  の変形を与えると、ダンパー位置でのダンパー力  $F_{d2}(t)$  は次式で表される<sup>10)</sup>。

$$F_{d2}(t) = K'_d u_{20} (\sin \omega t + \eta_d \cos \omega t) \quad (3)$$

ダンパー変形と力  $u_{d2}, F_{d2}$  と、コイルバネ位置に換算したときの等価なダンパー変位と力  $u_{d1}, F_{d1}$  は、

$$F_{d1}(t) = F_{d2}(t) \cdot (L_d / L_s), \quad u_{d1}(t) = u_{d2}(t) \cdot (L_s / L_d) \quad (4a,b)$$

と表される。式(4)を用いて、コイルバネ位置に換算したダンパー力  $F_{d1}(t)$  は次式となる。

$$F_{d1}(t) = K'_d (L_d / L_s)^2 u_{10} (\sin \omega t + \eta_d \cos \omega t) \quad (5)$$

この時、コイルバネ位置に変形  $u_1(t) = u_{10} \sin \omega t$  が生じるので、コイルバネ位置に作用する力  $F_1$  は、コイルバネの弾性力  $F_{s1} = K_s u_1(t)$  とダンパー力  $F_{d1}$  (式(5)) の和となる。それを式(3)のように整理することで次式が得られる。

$$F_1(t) = F_s(t) + F_{d1}(t) = K'_{eq} u_{10} (\sin \omega t + \eta_{eq} \cos \omega t) \quad (6a-c)$$

$$K'_{eq} = K_s + K'_d (L_s/L_d)^2, \quad \eta_{eq} = \frac{\eta_d}{1 + (K_s/K'_d)(L_s/L_d)^2}$$

ここに、 $K'_{eq}$ 、 $\eta_{eq}$ はそれぞれシステムの貯蔵剛性および損失係数である。また、コイルバネ2本分のバネ定数 $K_s$ の値は、個々の検査に基づき与えられている。

さらに、システムの共振時の固有振動数 $f'_{eq}$ および減衰定数 $\xi'_{eq}$ は次式より得られる。

$$f'_{eq} = \sqrt{K'_{eq}/M_{eff}} / (2\pi), \quad \xi'_{eq} = \xi_0 + \eta_{eq}/2 \quad (7a,b)$$

ここで、 $M_{eff}$ =コイルバネ位置に換算した等価な質量(=  $K_s/(2\pi f_0)^2$ )であり、非制振システムの自由振動試験(3.1節)より求められる。

以下に、自由振動時のダンパー履歴と式(1)、(6)、(7)より求めたシステムの $f'_{eq}$ および $\xi'_{eq}$ と、自由振動時の変位波形より求めた $f_{eqf}$ および $\xi_{eqf}$ を比較し、本手法および実験装置の精度について検証する。

図9は、固有振動数の精度( $f'_{eqf}/f_{eqf}$ )および減衰定数の精度( $\xi'_{eqf}/\xi_{eqf}$ )を、各 $\xi_{eqf}$ につき粘性、粘弾性システムそれぞれでプロットしている。図9より、 $\xi_{eqf} = 0.8\%$ での粘弾性システムの $\xi'_{eqf}$ に多少の誤差があるが、それ以外では、ダンパー履歴から求めた $f'_{eqf}$ 、 $\xi'_{eqf}$ は、システム変位波形から求めた $f_{eqf}$ 、 $\xi_{eqf}$ と精度良く一致することが確認された。

以上、自由振動試験でのローカルなダンパー履歴から、幾何学的関係と定常振動時の理論の拡張によりシステム特性を算出する本手法を用いることで、本実験装置が高精度にダンパー履歴を計測できることも確認できた。

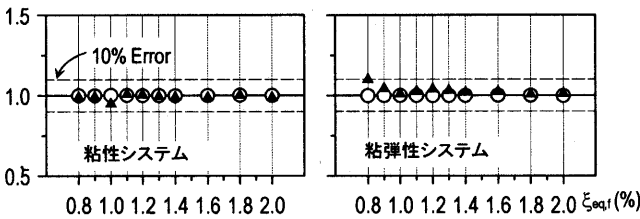


図9 自由振動試験での $f_{eq}$ 、 $\xi_{eq}$ の比較(○  $f'_{eqf}/f_{eqf}$  ▲  $\xi'_{eqf}/\xi_{eqf}$ )

#### 4. 風洞実験結果

##### 4.1 気流性状

本論文では、実験気流を一樣流とし、風速を徐々に上げながら実験を行う。風洞内に模型を設置しない状態で計測した模型位置での、主流方向の平均風速 $U$ 、および乱れ強さ $I_u$ ( $I_u = \sigma_u/U$ ;  $\sigma_u$  = 主流方向の変動風速の標準偏差)の鉛直プロファイルを図10(a)、(b)に示す。ここに、 $Z$ は端板上面からの高さを表す。図10(a)より、いずれの風速においても、平均風速の鉛直分布の一樣性が確保されたことが確

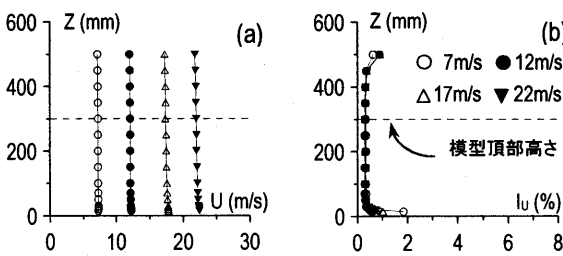


図10 気流性状:(a)平均風速,(b)乱れ強さ

認できる。また、図10(b)の乱れ強さは、端板近傍で大きいのが、その範囲は模型高さに比べて十分に無視でき、それを除いた乱れ強さは0.3%以下であることから、一樣流が生成されていると判断できる。模型位置からX、Y方向に $\pm 4B_m$ の地点でも計測を行い、空間的にも一樣流であることを確認した。

##### 4.2 実験方法および振動応答曲線

風洞実験時の粘弾性体は、エネルギー吸収により温度が上昇するため、各実験において周辺温度を制御して粘弾性体の表面温度が十分に定常状態(4.3節、後述)となるまで待った後、52.4288秒間(2.2節)の計測を行った。また、その間、粘弾性体の表面温度が一定であることも確認した。設定した $\xi_{eq}$ と風速 $U$ において、この実験を行った後、 $U$ を少し増やし次の実験を行った。その際に振幅が増加して温度上昇および粘弾性体の軟化が起きる場合もあり、その時はダンパー周辺温度を低く調節し、所定の温度ひいては減衰定数を保つようにした。このような実験を十分に広い範囲の $U$ で行った後、新たに減衰定数を設定して、再び $U$ を逐次増加させながら各実験を行った。

図11(a)、(b)に風洞実験より得られた、粘性および粘弾性システムの応答曲線を示す。図の各シンボルが各実験を示し、横軸は無次元風速 $V_r$ (式(8a))、縦軸は模型回転角の標準偏差 $\phi_{rms}$ (式(8b))である。

$$V_r = U/(f_0 B), \quad \phi_{rms} = \sigma_y/L_M \quad (8a,b)$$

ここで、 $\sigma_y$  = 変位計測位置での応答変位の標準偏差、 $L_M$  = ピボットから変位計測位置までの距離(= 118 + 25 = 143 mm, 図1(a))である。

図中の $\delta$ は質量減衰パラメータと呼ばれ<sup>6)</sup>、次式の如く質量比と減衰定数の積で表される。

$$\delta = \frac{\tilde{M}}{B^2 L_H \rho} \xi_{eq} = \frac{K_s L_s^2}{(2\pi f_0)^2 B^2 L_H^3 \rho} \xi_{eq} \quad (9)$$

ここに、 $\tilde{M}$  = 一般化質量(付録B参照)、 $\rho$  = 空気密度、 $L_H$  = ピボットから模型頂部までの距離(= 350 mm, 図1(a))である。本実験では質量比を一定とし、減衰定数のみ変えて $\delta$ の設定をした。 $\delta$ と $\xi_{eqf}$ の対応関係や粘弾性体表面の設定温度を表1に示す。

図11(a)の粘性システムの実験結果はアスペクト比6、辺長比1で行った田村らの一樣流実験<sup>11)</sup>と良く対応することを確認した。 $\delta = 0.64$ のケースでの粘弾性システムにおける $V_r = 10.5 \sim 11.3$ の範囲(図11の破線)の実験は、粘弾性体の温度制御が困難になったため行えなかった(次節参照)。

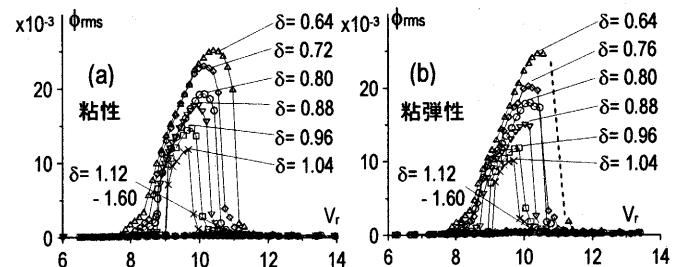


図11 応答曲線:(a)粘性システム,(b)粘弾性システム

表1  $\delta$ と $\xi_{eqf}$ の対応関係および粘弾性体表面温度

$\delta$	0.64	0.72	0.80	0.88	0.96	1.04	1.12	1.28	1.44	1.60
$\xi_{eqf}$ (%)	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00
温度 (°C)	52.2	50.0	43.5	41.5	39.0	38.0	36.2	34.0	32.0	31.0

### 4. 3 粘弾性システムの温度制御

本実験では、ダンパー周辺温度を調節して制御した粘弾性体の表面温度によって、システムの減衰定数を決定している。図12は、粘弾性体の表面温度とダンパー周辺の温度を各  $V_r$  でプロットしたものである。ここでは例として質量減衰パラメータ  $\delta = 0.64$ ,  $\delta = 1.60$  の2ケースの結果を示す。

図12上段の  $\delta = 0.64$  のケースにおいて、高さ  $H_d = 8\text{mm}$  の粘弾性体が  $\pm 2\text{mm}$  以上変形する  $V_r = 9 \sim 11$  の範囲 (図11b) では、振幅が大きくなるにつれて粘弾性体内部の熱発生も著しくなり、粘弾性体の温度が上昇する。しかし、ダンパー周辺温度を下げることで、ダンパーと周辺との温度差が大きくなって、熱伝達が促進されるため、粘弾性体内部の熱が外部に放出されやすくなる。これにより、熱の発生と放出が平衡状態となり、ダンパー周辺温度を固定したまま粘弾性体の表面温度を一定に保つことができる。本試験のように、一定の質量減衰パラメータ  $\delta$  における応答曲線 (図11(b)) を完成させるためには、振幅あるいは  $V_r$  の大小に関わらず粘弾性体の特性が一定でなければならない、粘弾性体の表面温度は一定である必要がある。

しかし、 $\delta = 0.64$  の  $10.5 \sim 11.3$  の実験では粘弾性体の表面温度を一定に保つことが出来ず、その範囲での粘弾性システムの実験が行えなかった (図11(b)および図12上段)。以下にその理由を述べる。

$\delta = 0.64$  のケースにおいて、 $V_r = 10.5$  の実験での周辺温度は表面温度に比べて約  $15^\circ\text{C}$  低く保った (図12上段)。次の実験のために  $V_r$  を増加させた場合、渦励振のピークを超えた範囲となり、そのときは、

- ① 応答の低減によって粘弾性体が発生する熱量は減少する。
  - ② 周辺温度が低いことから、粘弾性体の温度が急激に低下する。
  - ③ ダンパー温度の低下によってシステムの減衰定数は増加する。
  - ④ 減衰の増加により応答が低減する。
- ①~④が連鎖的に繰り返されることで、減衰が急激に増加し、ロックイン領域を外れたため振幅は急激に減少する。このような急激な粘弾性体の温度低下に対し、電球の熱では急速に粘弾性体を温めることが出来ず、 $\delta = 0.64$  の  $V_r = 10.5 \sim 11.3$  の実験では表面温度を一定に制御することが出来なかった。

図12下段の  $\delta = 1.60$  では、ダンパー変形量が小さいため (図11(b))、粘弾性体の温度上昇は殆ど無く、 $V_r$  の変化に関わらず周辺温度を変化させることなしに表面温度を一定に保つことができた。

上述した  $\delta = 0.64$  の  $V_r = 10.5 \sim 11.3$  の実験を除いたいずれのケースにおいても、粘弾性体の表面温度を、風洞実験前の自由振動試験にて決定した温度に対し、0.5%以内の精度で制御することが出来た。

一般に、ロードセルによる計測は温度の影響を受けることが知られている。本実験においても、図12に示した  $\delta = 0.64$  のケースから

も分かるように、実験ごとに周辺温度を上昇または低下させて粘弾性体の表面を目標とする温度 (表1) に保っている。そのため、各実験での周辺温度は、各ケースの最初 ( $V_r = 0$ ) での値とは異なるので、 $V_r = 0$  で設定したロードセルの基準値が変化する現象 (オフセット) が発生する。しかし、各実験において、表面温度が一定となるのを待って計測しているため (上述)、その時の周辺温度は一定値となる。これにより、ロードセルで計測される振幅、つまり平均値を除いた変動成分は温度の影響を受けない。風直角方向の応答では、平均成分を有しないため、後述する風洞実験時のダンパー履歴 (図14) でのダンパー力  $F_d$  は変動成分を用いている。

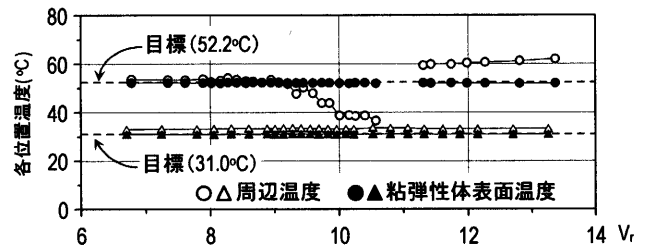


図12 粘弾性体と周辺温度の変化(上段:  $\delta = 0.64$ , 下段:  $\delta = 1.60$ )

### 4. 4 風応答時の振動特性

図13(a), (b)に実験結果の代表例として、 $\delta = 0.80, 0.64$  の2ケースそれぞれにおいて、粘性・粘弾性システムの応答曲線を併せて示す。また、図14に、特に  $V_r = 7, 10, 12$  での粘性・粘弾性ダンパーの履歴を示す。なお、履歴は、それぞれの実験において、最大振幅が生じた付近での連続10サイクルを示している。なお、粘性ダンパーの結果は、粘弾性ダンパーと比較できるように、コイルバネ位置に換算した等価な履歴である (式(4))。

図13のように、粘性・粘弾性システムの結果は、粘性ダンパーでの実験結果と良く一致している。図13(b)の  $\delta = 0.64$  のケースでの粘弾性システムにおいて  $V_r = 10.5 \sim 11.3$  の実験は、4.3節で述べたように、粘弾性体の温度を制御できず、実験が行えなかった。しかし、

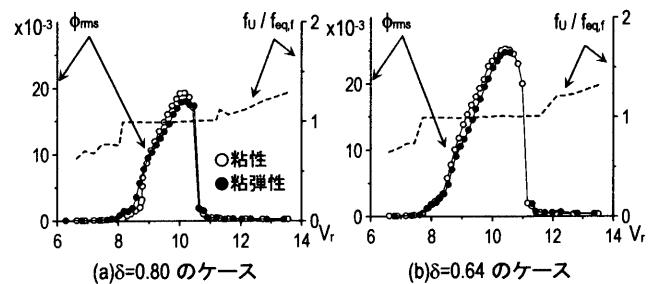


図13 応答の比較およびロックインの確認

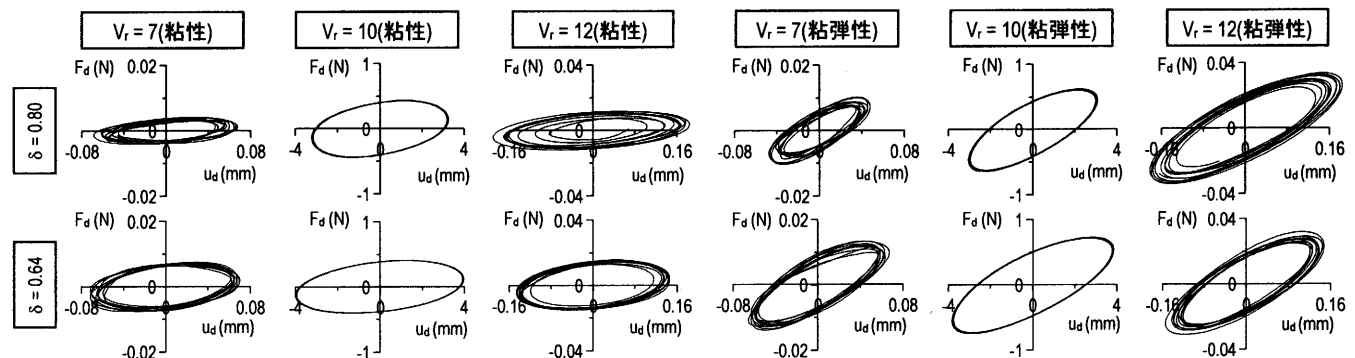


図14 粘性および粘弾性システムの風応答時のダンパー履歴(コイルバネ位置)

$V_r = 10.5$  までの傾向に基づき粘弾性システムの応答曲線は、粘性システムと一致すると推測できる。

図 13 の破線は、建物模型の風下に設置した I 型熱線流速計より得た後流の渦発生周波数  $f_v$  (2.2 節) を、自由振動時のシステムの固有振動数  $f_{eqf}$  で基準化したものである。 $f_v$  が  $f_{eqf}$  と一致 (ロックイン) し、渦励振が発生する  $V_r = 8 \sim 11$  の領域では (図 13)、ピークファクター、つまり 応答変位の最大値と応答変位の標準偏差 ( $\sigma$ , 4.2 節) が  $\sqrt{2}$  に近くなり、応答性状が正弦波の定常振動となる。そのため、図 14 の  $V_r = 10$  の粘性・粘弾性の履歴において、振幅が一定で 10 サイクルの履歴が重なったものとなるが、 $V_r = 8 \sim 11$  以外の領域では、ピークファクターが 3 ~ 5 となり、定常振動でなくなる。このことは、図 14 の  $V_r = 7$  または 12 のややランダム成分を含んだ履歴から理解できる。ただし、そのような領域においても、振動数成分は  $f_{eqf}$  が卓越するため、粘弾性ダンパーの履歴の傾きは殆ど変化しない。

図 15(a), (b) は、 $\delta = 0.80, 0.64$  のケースでの風洞実験時の履歴から、半サイクル毎に求めた  $K'_{d,w}$ ,  $\eta_{d,w}$ ,  $\xi'_{eq,w}$  の平均値それぞれを、自由振動試験から得た  $K'_{df}$ ,  $\eta_{df}$ ,  $\xi'_{eq,df}$  で基準化した値を示す。以後、風洞実験時から得た値には、添え字 'w' を付ける。図 15 より、多少のバラツキはあるものの、粘性・粘弾性システムの風応答時の  $K'_{d,w}$ ,  $\eta_{d,w}$ ,  $\xi'_{eq,w}$  は  $V_r$  によらず、自由振動試験より得た値とそれぞれ一致することが確認できた。

以上、粘弾性ダンパーの表面温度を制御することにより、粘弾性システムの動的特性を  $V_r$  や振幅によらず一定に保つことができることを示し、このことにより、粘性システムと一致した結果となることが確認された。

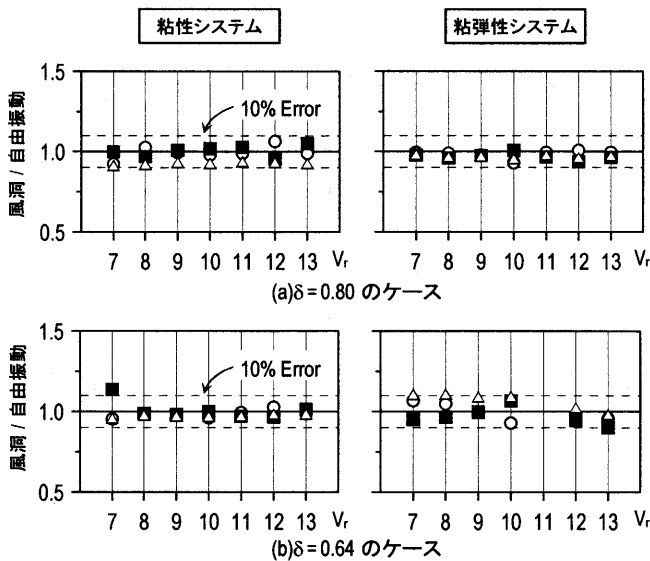


図 15 自由振動試験と風洞実験の比較 (○  $K'_d$ , ■  $\eta_d$ , △  $\xi_{eq}$ )

### 5. 粘弾性ダンパーの熱伝導解析

#### 5.1 目的および解析手法

本実験では、粘弾性体の特性を様々に変えて実験するため、その表面温度を制御した。しかし、長時間振動している粘弾性体では、表面温度と内部温度が大きく異なる可能性がある<sup>3)</sup>。本章では、文献 5 で提案した 3 次元熱伝導解析手法により、粘弾性体内部・表面の温度分布を把握し、表面温度を代表温度とすることの妥当性を示す。解析手法は 3 次元有限要素を用いた汎用プログラムを利用する

ものであり、その詳細は文献 5 を参照されたい。まず 5.2 節で本粘弾性材料の温度依存性・振動数依存性を本ダンパーの試験結果に基づき評価した上で任意の温度、振動数に対する材料の力学特性値  $G'$ ,  $\eta$  の予測式を構成する。5.3 節では 3 次元有限要素モデルについて説明する。5.4 節では解析結果が本実験結果と合うことを述べた上で、粘弾性体の表面温度で内部温度を代表することの妥当性を示す。

#### 5.2 粘弾性ダンパーモデルのパラメータ同定手法

本実験で用いた粘弾性体はアスペクト比が大きいため、一般に用いられる純せん断変形をするものと異なり、曲げせん断変形が生じるため、解析に用いるせん断弾性係数  $G'$  を、ダンパーの貯蔵剛性  $K'_d$  から評価するためには、曲げせん断を考慮した梁理論を用いる必要がある。しかし、3 次元有限要素モデル (図 18, 後述) による静的解析結果とこの梁理論を比較した場合、上下板付近の粘弾性体の歪が拘束される影響を無視できなことが分かった。そこで、本論文では、梁理論に境界による歪み拘束の影響を考慮した修正梁理論 (付録 C 参照) より、本実験で用いた粘弾性体の等価粘弾性体のせん断弾性係数  $G'$  を評価する (式(10))。

$$G' = K'_d \frac{H_d}{A_s} \left[ 1 + \frac{(H_d - 2H_0)^3}{24(1+\nu)I} \frac{A_s}{H_d} \right] \quad (10)$$

ここで、 $A_s = 5A/6$  ( $A = B_d \times D_d$ )、 $\nu =$  ポアソン比 ( $= 0.47^5$ )、 $I =$  断面二次モーメント、 $H_0 =$  粘弾性体の断面が歪み拘束される上下板からの距離であり、3 次元有限要素解析による静的解析と修正梁理論 (式(10)) が一致するように決定し、 $H_0 = 0.43 \text{ mm}$  とした。

自由振動試験から得た  $K'_d$  より式(10)を用いて  $G'$  を算出する。表面温度 35°C, 40°C, 45°C, 50°C の自由振動試験を行い、それぞれの温度に対し 3 種類のコイルバネ ( $K_s = 2.36, 9.42, 22.69 \text{ N/mm}$ ) を用いることで振動数を変化させる。算出した  $G'$  および  $\eta$  ( $= \eta_d$ ) を図 16(a), (b) に示す。また、図 16 には 40°C で同定したモデルも併記している。

図 17 は、図 16 の結果をシフトファクター<sup>8)</sup> ( $\lambda$ ) だけ水平に移動させ、等価振動数<sup>8)</sup> ( $\lambda f$ ) を横軸とした場合の図であり、それぞれの温度での値は、40°C のモデルに良く一致していることが確認できる。文献 8 の手法により同定した分数微分パラメータは、 $a_{ref} = 0.0037$ ,  $b_{ref} = 0.0358$ ,  $\alpha = 0.8831$ ,  $G = 1.043 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$ ,  $p_1 = 69.509$ ,  $p_2 = 1105.817$ ,  $\theta_{ref} = 40^\circ\text{C}$  である。

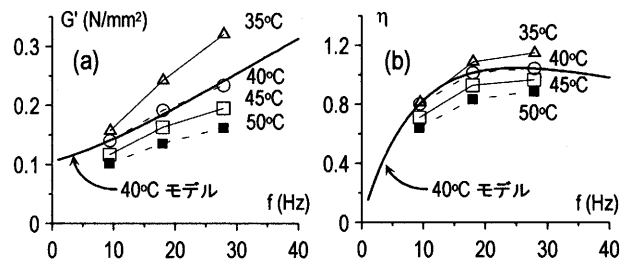


図 16 温度振動数別実験結果および 40°C モデル: (a)  $G'$ , (b)  $\eta$

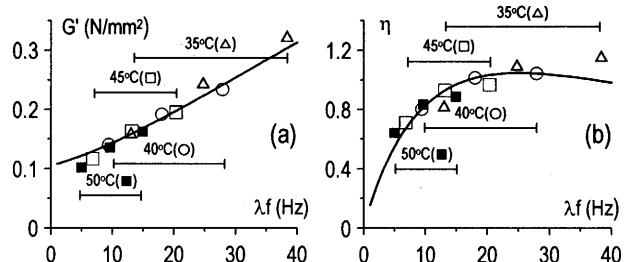


図 17  $\lambda$  によるシフト後の温度・等価振動数  $\lambda f$  の関係: (a)  $G'$ , (b)  $\eta$

### 5. 3 三次元有限要素解析モデル

図18に粘弾性ダンパーの3次元有限要素モデルを示す。ここでは、粘弾性体およびアルミ製の上下板までをモデル化した。解析にはABAQUS 6.3Version<sup>12)</sup>の変形-温度連成8節点立体アイソパラメトリック要素を用いた。粘弾性体部分の分割数は、 $B_d$ を6分割、 $D_d$ を10分割、 $H_d$ を16分割とし、ダンパー全体では3,872要素である。この分割数での静的解析の解は、十分な解の収斂性が得られていることを確認している。また、幾何学的非線形性の影響は無視できるほど小さい。

上板にY方向の強制変形として、ダンパー最大変形  $u_{d,max}$  を与え、下板底面を固定とした。その反力の合計値を  $F'_d$  とし、それを最大変形  $u_{d,max}$  で除すことでダンパー貯蔵剛性  $K'_d$  を算出した。なお、上板は、XおよびZ方向には変位しない。上下のアルミ板と粘弾性体の接着面は完全結合しており、粘弾性体での発熱がアルミ板へ熱伝導される。また、上下のアルミ板と粘弾性体が接着している面以外に空気への熱伝達を設定した。周辺温度は実験条件に合わせ一定値とした。解析に用いた粘弾性体およびアルミ材の材料値は、熱伝導係数(粘弾性体: 0.159, アルミ材: 204 W/m<sup>2</sup>C)、比熱(粘弾性体: 1870, アルミ材: 896 J/kg<sup>2</sup>C)、密度(粘弾性体: 1000, アルミ材: 2707 kg/m<sup>3</sup>)、ポアソン比(粘弾性体: 0.47, アルミ材: 0.3)である。また、アルミ材の上板、下板のヤング係数は  $7.06 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> とした。

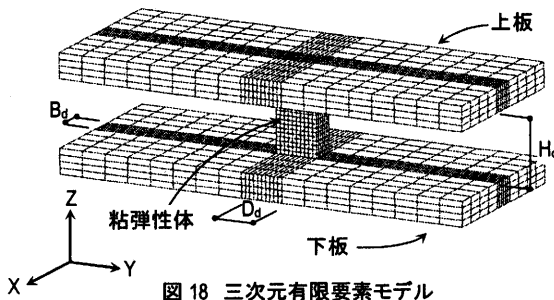


図18 三次元有限要素モデル

### 5. 4 解析結果と実験結果の比較

表2に解析に用いた  $V_r = 10$  ので、 $\delta = 0.64 \sim 0.88$  のケースでの周辺温度、ダンパー最大変形  $u_{d,max}$  を示す。周辺温度およびダンパー変形は実験値を用いた。

解析に用いた熱伝達係数は文献13をもとに、解析の表面温度およびダンパー貯蔵剛性が実験値と一致するよう試行錯誤的に決定し、粘弾性体の半分より下板側の熱伝達係数  $\alpha_{c,low}$  を 50W/m<sup>2</sup>C、粘弾性体の半分より上板側の熱伝達係数  $\alpha_{c,up}$  を、振動していることにより放熱が促進される効果を考慮して、75W/m<sup>2</sup>Cとした。決定した熱伝達係数を用いて行った解析より得られた、定常状態<sup>9)</sup>での表面温度およびダンパー貯蔵剛性  $K'_d$  の実験値との適合度 (FEM/実験) を表2に示す。風洞実験時の振動数が約18Hzと高いことで、ダンパー周辺が強制対流<sup>13)</sup>となるため、文献5に比べ熱伝達係数は大きな値となった。

表2より、解析結果は表面温度および  $K'_d$  が実験値と精度良く一

表2 解析結果と実験値の比較 ( $V_r = 10$ )

$\delta$	周辺温度 (°C)	$u_{d,max}$ (mm)	FEM / 実験	
			表面温度	$K'_d$
0.64	38.72	4.327	0.998	1.045
0.72	40.49	3.661	1.009	0.958
0.80	39.37	3.344	1.116	1.017
0.88	38.58	2.835	1.108	0.972

致していることから、本解析結果は、高精度に風洞実験時の粘弾性ダンパーの性状を再現できていると判断できる。

図19に解析結果の一例として、 $\delta = 0.64$ ,  $V_r = 10$  の最大変形時の温度分布を示す。なお、図19は内部温度が分かるように、粘弾性体および上板について、粘弾性体のY方向の中心位置 ( $D_d/2$ , 図18) でカットして示している。図19より、上下板の温度は 38.8°C であり、周辺温度 (38.72°C, 表2参照) とほぼ等しいことから、本モデルの解析領域が十分であると判断できる。

図19の解析結果より、粘弾性体のX方向およびY方向の幅が小さいため、表面と中心の温度差は殆ど無い。ここでは紙幅の都合上示さないが、他の  $\delta$  や  $V_r$  の場合は、上記に比べ発熱量が小さいため、表面と中心部の温度差はさらに小さくなることを確認している。

以上より、粘弾性体の特性値を決定する温度を、表面温度で代表させることの妥当性が確認された。

上下のアルミ板付近の粘弾性体の熱は、熱伝導係数の大きいアルミ板へ熱伝導されるため、粘弾性体の中心部分に比べ温度が低くなる。しかし、粘弾性体内部の温度が均一である自由振動試験より得られたダンパー剛性と(3章)、内部温度が不均一である風洞実験時のダンパーがほぼ一致することから(図15)、粘弾性内部に局所的な低温部分があっても、ダンパー剛性に与える影響は小さいと考えられる。このことは、文献5で得られた知見と整合する。

さらに、熱伝達係数に幅をもたせた場合や、 $\alpha_{c,low} = \alpha_{c,up}$  とした場合についても同様に解析を行ったが、局所的な温度分布は多少異なるものの、ダンパー剛性に与える影響は殆どなく、文献5と同様、ダンパー剛性の再現には、熱伝達係数の精度はさほど必要でないことを追記しておく。

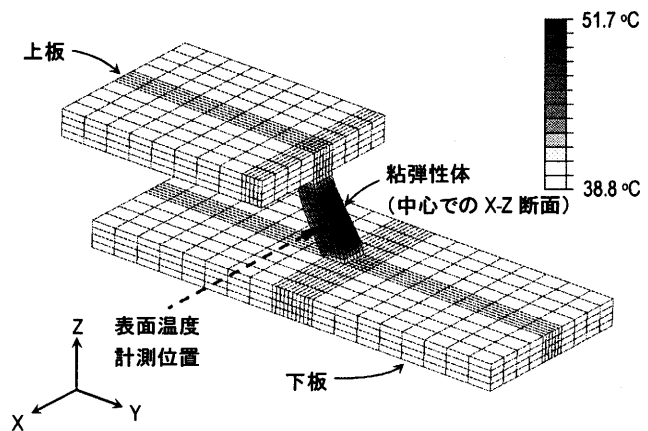


図19 ダンパー温度分布 ( $\delta = 0.64$ ,  $V_r = 10$ )

### 6. おわりに

本論文では、粘弾性体の温度を制御することにより粘弾性ダンパーの特性を変化させる実験手法を提案した。また、実験手法の確立のため、風洞実験時においてもダンパー履歴を計測できる装置を開発し、自由振動および一様流による風洞実験を行い、粘性ダンパーとの比較により検討を行った。以下にまとめる。

- (1) 自由振動時の履歴から、幾何学的関係および理論を用いてダンパーおよびシステムの評価する手法を提案し、自由振動時の変位波形と比較することで、風洞実験装置が精度良くダンパー履歴を計測できることを確認した。
- (2) 粘弾性ダンパーは、エネルギー吸収により粘弾性体の温度が上昇するが、過励振時にダンパー変形が大きくなる場合においても、周辺温度を下げることで粘弾性体の表面温度を一定に制御

できることを示した。

- (3) 風洞実験時に、粘弾性体の表面温度を自由振動時と等しくなるように制御すれば、自由振動時と同じダンパーおよびシステム特性が得られることを確認し、粘弾性ダンパーによる実験結果は、粘性ダンパーとほぼ一致することを示した。

3次元熱伝導解析により、ダンパーの粘弾性体が薄く、かつ空気に接する表面積も大きいこと、内部で発生した熱が表面に熱伝導され易く、よって表面温度と内部の温度差が殆ど無いことを確認した。このことにより、ダンパーの特性値を粘弾性体の表面温度で制御する温度制御型実験法が確立できた。

本論文では粘弾性ダンパーの特性が、システムの風応答に与える影響を明らかにするための基礎的な研究として、一様流を用いた風洞実験を行った。今後は本実験装置を用いて、実際の都市を想定した境界層乱流での風洞実験を行う予定である。境界層乱流の場合、一様流と異なり渦励振により急激に応答が増加することが殆どないため、粘弾性体の温度制御は、一様流での実験に比べ容易になることが予想される。また、境界層乱流は風力に広帯域な周波数成分を有するため、振動数依存性を有するダンパーの特性変化、およびその変化が風応答に与える影響を、風応答時のダンパー履歴を計測できる本実験装置の利点を生かし、明らかにしていく予定である。さらに、笠井らの予測手法<sup>9)</sup>と温度制御型実験法を融合させることで、振動依存風力を考慮した、粘弾性ダンパーの温度上昇に伴う特性変化が応答に及ぼす影響を実験的に検討する予定である。

謝辞

住友スリーエム株式会社から、粘弾性ダンパーを提供して頂いた。東京工業大学環境理工学専攻助手(当時)の曹曙陽氏、大学院生(当時)のDias.P.P.N.L氏、東京工業大学建築物理研究センター研究生(当時)の岡田玲氏には、風洞実験に関する貴重な御助言を頂いた。3次元有限要素解析に関しては、東京工業大学の元結正次郎助教授から貴重な御助言を頂いた。各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 東京工業大学建築物理センター: パッシブ制振構造シンポジウム第1回~第4回, 2000.3, 2001.12, 2002.12, 2004.11
- 2) (社)日本地震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル, 第1版, 2003.10, 第2版, 2005.9
- 3) 笠井和彦: 粘弾性材料-建物制振への適用, 未来材料, 2(3), pp.42-47, 2002.3
- 4) Ferry, J.D.: Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley & Sons Inc., Third Ed., New York, 1980
- 5) 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
- 6) 日本建築センター: 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 1994
- 7) Cho, K.-P., Cermak, J.E., Lai, M.-L. and Nielsen, E.: Viscoelastic damping for Wind-Excited Motion of a Five-Story Building Frame, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 77&78, pp.269-281, 1998
- 8) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊深, 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
- 9) 大木洋司, 笠井和彦, 高橋治: 微小振幅における速度依存ダンパーの性能について, 構造工学論文集, Vol.50B, pp.601-609, 2004.3
- 10) 笠井和彦, 大熊深: 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

- 11) 田村哲郎, 岡田玲, 和田章: 弾塑性ダンパーを有する高層建物の共振風速近傍での応答挙動に関する風洞実験, 日本建築学会構造系論文集, 第537号, pp.35-41, 2000.11
- 12) ABAQUS Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. 1997
- 13) J.P.ホールマン: 伝熱工学(上), プレイン図書出版, 1993

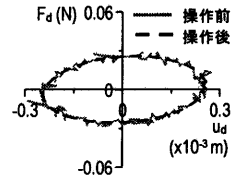
付録A ノイズ除去の方法

ダンパー特性をノイズの影響を受けにくい手法(式(1))で評価しているが、本論文ではさらにその精度を向上させるためにフィルター操作によるノイズ除去を行った。ダンパーの変位と力の双方に同じローパスフィルターを用いることで、位相を変化させずにノイズを除去することができる。

具体的には、実験より得られたダンパー力の時刻歴波形に対しFFTを行い、得られた実部・虚部データの55Hz以降を1/1000倍にする。実部と虚部の両方に同じフィルターをかけることにより、位相(スペクトル)はフィルターの前後で変化してない。なお、55Hzは固有振動数 $f_0$ の約3倍<sup>9)</sup>であり、パワースペクトル密度で55Hz以上のパワーが十分に小さいことを確認している。

次に、フィルター操作を行った実部と虚部データを用いて、逆FFTにより時刻歴波形を再生成し、得られた時刻歴波形に対し、移動平均幅5点でデータの平滑化を行った。ダンパー変位波形に対しても同様の方法でフィルター操作および平滑化を行う。

図A1に、上述した方法によりノイズを除去した履歴と、フィルター操作および移動平均を行っていない履歴を重ねて示す。図A1より、フィルター操作および移動平均を行うことでノイズは除去され、かつ位相のずれがないことが確認できる。



図A1 フィルター操作有無での履歴の比較

付録B 実験模型での質量減衰パラメータの決定

図8に示すようなピボットを中心に回転振動をする系を考える。回転剛性 $K_\phi$ は次式より表される。

$$K_\phi = K_s L_s^2 = I_\phi (2\pi f_{eq})^2 = \tilde{M} L_H^2 (2\pi f_{eq})^2 \therefore \tilde{M} = K_s L_s^2 / \{L_H^2 (2\pi f_{eq})^2\} \quad (B1)$$

ここで、 $I_\phi$ はピボット位置に関する慣性モーメント、 $\tilde{M}$ はピボットより下のおもりも考慮した、模型頂部位置での等価な質量である。本論文では、振動数依存性を有するダンパーがシステムや応答に与える影響に着目しているため、 $\delta$ を $f_{eq}$ ではなく $f_0$ を用いて無次元化している(式(9))。

付録C 歪み拘束部分の影響を考慮した梁理論

上下の境界からそれぞれ $H_0$ の範囲で軸方向以外の歪みが拘束されている場合の、せん断変形を考慮した梁理論は次式で表される。

$$F'_d = K'_d u_d = \left\{ \frac{(H_d - 2H_0)^3}{12EI} \cdot \frac{(H_d - 2H_0)^3 - H_d^3}{12E_0 I} + \frac{H_d}{G A_s} \right\} u_d \quad (C1)$$

ここで、 $E_0$ は境界の影響により軸方向以外の歪みが拘束される範囲のヤング係数であり、次式で表される。

$$E_0 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (C2a,b)$$

上式および $E = 2G(1+\nu)$ を式(C1)に代入し、 $\nu = 0.5$ として $K'_d$ について式(C1)を解くと次式となる。

$$K'_d = G' \frac{A_s}{H_d} \frac{1}{1 + (A_s/H_d)(H_d - 2H_0)^3 / \{24(1+\nu)I\}} \quad (C3)$$

上式を $G'$ について解くことで式(10)が得られる。なお、式(C3)による $G'$ は、 $\nu = 0.47$ として計算した $G$ の1.02倍である。

(2006年3月10日原稿受理, 2006年8月9日採用決定)