

制振建物に用いる粘性体ダンパーの エネルギー吸収に伴う温度上昇に関する基礎的研究 — その2 円柱座標系を用いた検討 —

Temperature Rise in Vibration-controlling Viscous Dampers Analysis Using a Cylindrical Coordinate System

三山 剛史*

Takafumi Miyama

Viscous dampers can reduce the shaking of buildings during earthquakes or other seismic activities. The application of this technology began in the 1980s, and was most often used for high-rise buildings. In recent years though, their use with wooden houses has become increasingly common. There are many types of dampers that reduce vibrations, however, this report only examined cylindrical viscous dampers. During an earthquake, the damper piston vibrates and pushes the viscous material through an orifice, thus producing an increase in temperature. The movement and temperature rise of the viscous material cannot be seen directly; only the surface temperature of the cylinder can be measured. Using cylindrical coordinate formulations, this study found that the temperature of viscous material varied according with its location in the cylinder. These data from this study can be utilized in subsequent experiments, particularly those using temperature measurement plans for dampers.

1. はじめに

1980年代から始まった制振構造は今では多くの建物で用いられ、現在では木造の建物にも採用されている。一般の人にも「免震」と「制振」はよく知られるところとなっているが、「免震」に比べ分かり難いものとなっている。多くの制振は振動エネルギーを熱に換え、建物の揺れを小さくすることであり、その状況を説明することは重要である。また、技術者にとっては制振ダンパーの力学的な特性だけでなく、粘性体の状況を知ることは重要である。本報で示す検討はシリンドー型粘性体ダンパーの内部や表面の温度の状況である。シリンドー型ダンパーの中で振動エネルギーを粘性体の温度に変える部分は限られており、その粘性体はピストンの動きに合わせて移動している。粘性体の状況を直接見ることもシリンドー内の粘性体の温度を測ることも現実的には難しいため、まず行えることは解析的に検討し、実験から得られるシリンドーの内部表面や外部表面温度などと比較し、その結果に基づいて内部の温度の状況を予測することである。この検討は計画中の加振実験でどのような温度計測を行えばよいかを検討するためのものである。

2. 粘性体ダンパー

本研究で想定している粘性体ダンパーの形状を図1に示す。シリンドーにピストンが串型に入っており、間には粘性体が入っている。シリンドーとピストンの間には隙間があり、振動によ

* 居住空間デザイン学科 教授

りピストンが動くとその隙間を粘性体が通り抜け、そのときに生じる抵抗力により振動エネルギーを吸収し、その結果として粘性体の温度は上昇する。隙間を通り抜けた粘性体はシリンダーの中をピストンの動きに合わせて移動している。そのため、温度の高い部分が移動しながら、シリンダー筐体の表面に熱を伝えてエネルギーを放出している。

3、解析方法

ダンパーの形状がシリンダー型なので、円柱座標系を用い、同一半径上で同じ温度として扱う。粘性体は移動を繰り返しているが、この解析ではその移動を考えず、定められた範囲で振動エネルギーを熱に変えていると考える。解析方法を図2に示す。

加振方向（以下ロッド方向）にx、半径方向にrをとる。半径方向は Δr のメッシュ幅、ロッド方向は等間隔に Δx の微小要素幅を取る。メッシュ点上にその場所の温度Tを取っている。 T_0 の温度を持つ微小要素（この図では奥行きを $\Delta \theta r_0$ ほど持たせているが、1周分でも同じ）の温度上昇と周囲から入ってくるエネルギーの釣り合い式を立てる。周囲の温度は $T_{上}$ 、 $T_{下}$ 、 $T_{左}$ 、 $T_{右}$ で表され、それぞれの温度の点から T_0 までの熱伝導率は λ で表される。微小時間 Δt におけるエネルギーの釣り合いは(1)式で表せる。

$$\frac{\lambda_{上}}{\Delta r_{10}}(T_{上} - T_0) \frac{r_1 + r_0}{2} \Delta \theta \Delta x \Delta t + \frac{\lambda_{下}}{\Delta r_{0-1}}(T_{下} - T_0) \frac{r_0 + r_{-1}}{2} \Delta \theta \Delta x \Delta t + \frac{\lambda_{右}}{\Delta x}(T_{右} - T_0) \frac{r_1 - r_{-1}}{2} r_0 \Delta \theta \Delta t + \frac{\lambda_{左}}{\Delta x}(T_{左} - T_0) \frac{r_1 - r_{-1}}{2} r_0 \Delta \theta \Delta t = \rho C \Delta T r_0 \Delta \theta \frac{r_1 - r_{-1}}{2} \Delta x \quad (1)$$

ここで

- T : 温度
- λ : 熱伝導率
- r : 半径
- Δt : 微小時間
- ρ : 比重
- C : 比熱

(1) 式を解くと T_0 の点の温度変化 ΔT は(2)式で与えられる。



図1 粘性体ダンパー

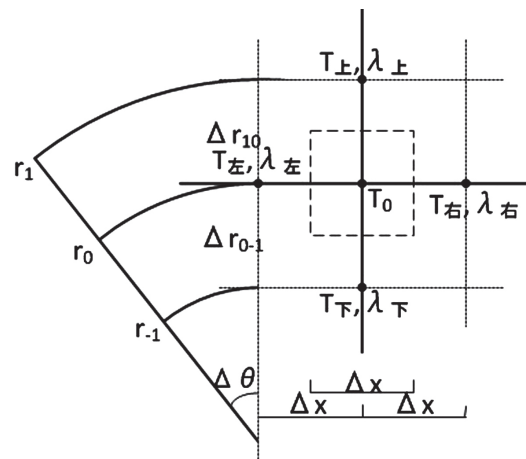


図2 解析方法

$$\Delta T = \frac{\Delta t}{\rho C} \left(\frac{\lambda_{上}}{r_0 \Delta r_{10}} \cdot \frac{r_1 + r_0}{r_1 - r_{-1}} (T_{上} - T_0) + \frac{\lambda_{下}}{r_0 \Delta r_{0-1}} \cdot \frac{r_0 + r_{-1}}{r_1 - r_{-1}} (T_{下} - T_0) + \frac{\lambda_{右}}{\Delta x^2} (T_{右} - T_0) + \frac{\lambda_{左}}{\Delta x^2} (T_{左} - T_0) \right) \quad (2)$$

シリンダー表面で、熱伝導率 λ が与えられず、熱伝達率 h_f が与えられる場合は適当なメッシュ点を与え、等価な熱伝導率 λ' を定義する。

$$\lambda' = h_f \Delta x \quad \text{もしくは} \quad \lambda' = h_f \Delta y \quad (3)$$

4. 解析モデル

シリンダーは0.02mの厚さを持つ直径0.28mの鋼管で、約0.72mの長さがある。図1に示した粘性体ダンパーの右上部分を取り出して解析モデルとしている。図3に解析モデル図を示す。このモデル図の上側は厚さ0.02mの鋼管、右側は厚さ0.1mの鋼製のふたである。下側にはシリンダーのロッドがあるが、このモデルではこのロッドを無視している。左側にはピストンがあるが、このモデルではこのピストンも無視している。すなわち左側、下側は粘性体で連続しているものとして解析を行う。このモデルの上側、右側は一定温度20℃の外気にふれており、下側と左側は対称の境界条件とする。このメッシュ割において、ロッド方向は一定幅5mmで分割されており、半径方向は半径が異なっても体積が等しくなるように分割している。図中の発熱部分は振動エネルギーが熱に変わる範囲を示している。この部分で温度上昇し、その温度が他の部分に伝わると考えている。

仮定した材料特性を表1に示す。粘性体の定数はシリコンの値から類推したものである。ダンパーが吸収したエネルギー量はかなり多く設定し、 $3 \times 10^6 \text{ kNmm}$ とした。これは±30mmの振幅で400kNの減衰力で60サイクル動く場合を想定している。

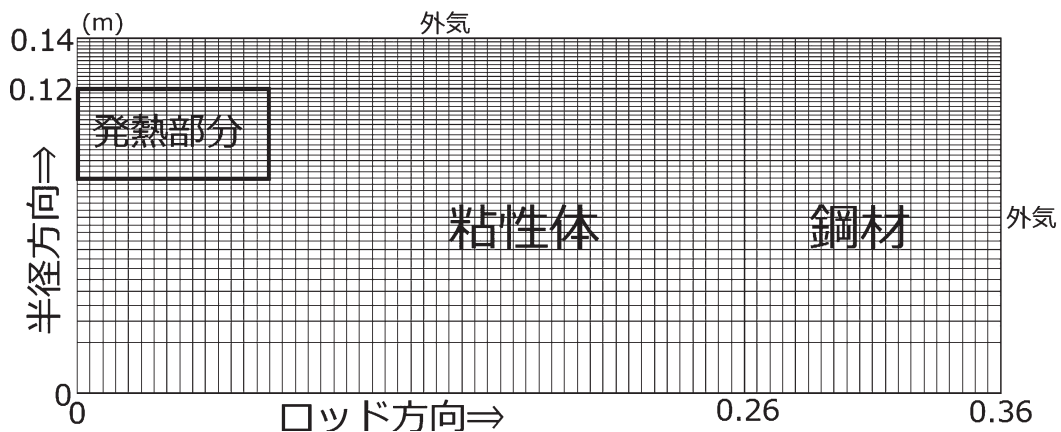


図3 解析モデル

表1 材料特性

材料		粘性体	鋼材	外気
熱伝達率 h_f	$\text{W/m}^2\text{k}$	—	—	10
熱伝導率 λ	W/mk	0.15	50	—
密度 ρ	kg/m^3	1000	7800	1.2
比熱 C	j/kgk	1500	470	1006

5. 解析パラメータ

4つのケースについてパラメータ解析を行った。それぞれのパラメータについて以下の述べる。

1) 加振周波数を変化させた場合

ダンパー吸収エネルギーが 3×10^6 kNmmになるまでの時間（加振時間） T_p を変化させた。 T_p は0.5分、1分、2分、3分、4分とした。60サイクルでこの繰り返しをするためには、周波数としては2Hzから0.25Hzに変化させた場合に相当する。発熱部分の大きさは半径方向に0.075m～0.12m、ロッド方向に0m～0.03mとしている。

2) 発熱部分の半径方向幅を変化させた場合

ロッド方向の発熱幅はロッド方向に0m～0.03mと一定に保ち、半径方向の発熱幅を変化させている。半径方向の発熱幅は0.069m～0.12m、0.080m～0.12m、0.089m～0.12m、0.098m～0.12mとしている。エネルギーが最大となる時間 T_p は1分とする。

3) 発熱部分のロッド方向幅を変化させた場合

発熱部分の半径方向幅は0.075m～0.12mと一定に保ち、ロッド方向幅は0m～0.01m、0m～0.02m、0m～0.03m、0m～0.04m、0m～0.05mの場合について比較する。加振時間 T_p は1分と3分の場合についてそれぞれ検討する。

4) 発熱部分に温度勾配がある場合

上記の1)から3)は発熱部分が消費エネルギーから一様に温度上昇すると考えているが、ここでは発熱部分に温度勾配がある場合を考える。図4に温度勾配の決め方を示す。発熱部分の発熱温度が一定の場合を基本とし、温度勾配のある場合は要素数を半径方向に増やし、中心部分の発熱温度が低くなるように決める。この際、表面部分の発熱温度は温度一定の場合と同じとし、中心部にいくにしたがって低くなるようにする。中心部に要素数を増やすに従って全体の体積は大きくなるが、温度一定の場合と温度勾配のある場合で温度上昇に関わるエネルギー量は同一となるように温度勾配 α を定めている。半径方向幅は0.085m～0.12mの場合を温度一定の場合とし、0.075m～0.12m、0.063m～0.12mの場合に温度勾配があるものとしている。ロッド方向幅は0m～0.015m、0m～0.040mの2通りの場合を検討する。なお T_p は1分としている。

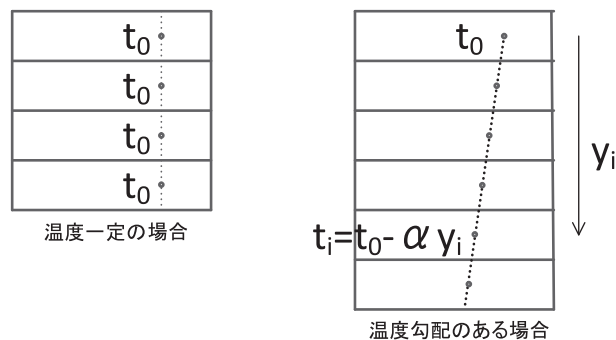


図4 発熱部分の温度勾配

6. 解析結果

解析結果としてシリンダー中央の表面（図3の左上の点）の温度を示す。

6.1 加振周波数が増えた場合

加振が終わるまでの時間を変化させた場合の解析結果を図5に示す。発熱部分の大きさは半径方向に0.075m～0.12m、ロッド方向に0m～0.03mとしている。加振が終了するまでの時間が短

い場合は単位時間に吸収されるエネルギー量が大きいので温度上昇の勾配が大きくなっている。逆に加振が終了するまでの時間が短い場合は温度上昇の勾配が小さくなっている。加振でエネルギーを吸収している間もダンパー表面で熱を放出しているため、加振時間が長いほうがピークの温度は低くなっている。加振時間の短い結果は早い時間に最大温度となるため、シリンダー表面からの熱の放出も早く、他のケースに比べて加振終了後の温度低下するときの温度は他のケースより低くなっている。トータルの消費するエネルギーは同じなので、時間が経過した状態での温度はどのケースもほぼ一定の値になっている。

6.2 発熱部分の半径方向幅を変化させた場合

図6に解析結果を示す。半径方向の発熱幅が狭い0.098m～0.12mの場合は他の場合と吸収エネルギーは同じであるが、発熱部分の体積が小さいため温度上昇が一番大きくなっている。半径方向の発熱幅の広い0.069m～0.12mの場合は温度上昇が小さくなっている。最大温度を経験した後の温度の低下は表面温度が高いほど大きく、表面温度が低いほど低下は小さくなっている。

6.3 発熱部分のロッド方向幅を変化させた場合

発熱部分の半径方向幅は0.075m～0.12mと一定に保ち、加振時間 T_p を1分とした場合でロッド方向に発熱部分の幅を変化させた場合を図7に示す。発熱部分の幅が広がると発熱温度が低くなるためグラフのピーク温度は低くなっている。またシリンダー中央部の回りも同程度の温度なのでピーク後の温度の低下は発熱幅が狭い場合より小さくなっている。

加振時間 T_p を3分とした場合の結果を図8に示す。図5でも述べたように加振時間 T_p が長くなるとピークの温度は低くなる。 $T_p=3$ 分の図8は $T_p=1$ 分の図7に比べピークの温度は低くなっている。ピーク後の温度の低下も同じく緩やかになっている。

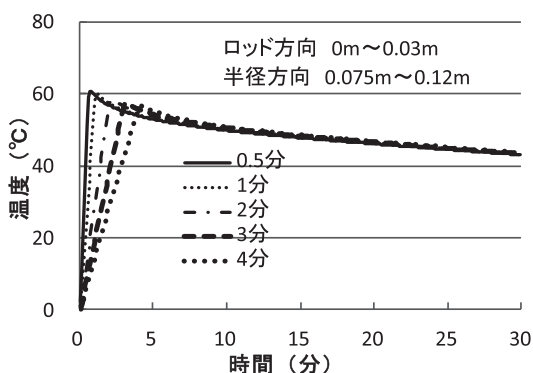


図5 解析結果 (加振時間の影響)

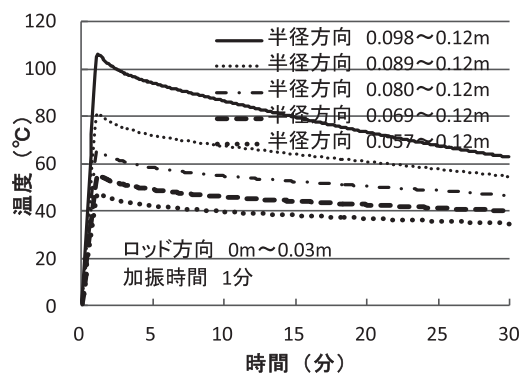


図6 解析結果 半径方向幅の影響

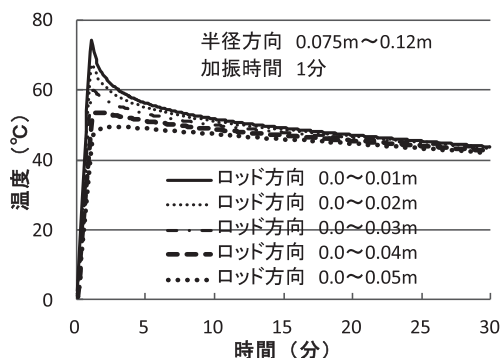


図7 解析結果 (ロッド方向幅の影響)

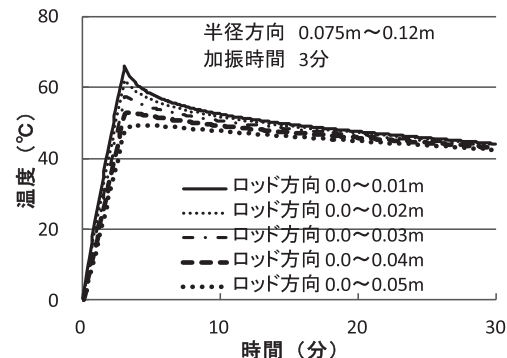


図8 解析結果 (ロッド方向幅の影響)

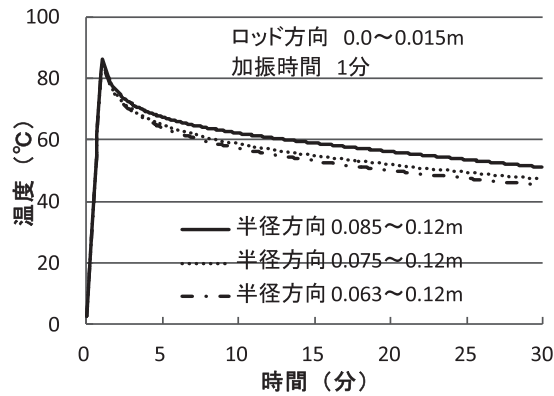


図9 解析結果 (温度勾配の影響)

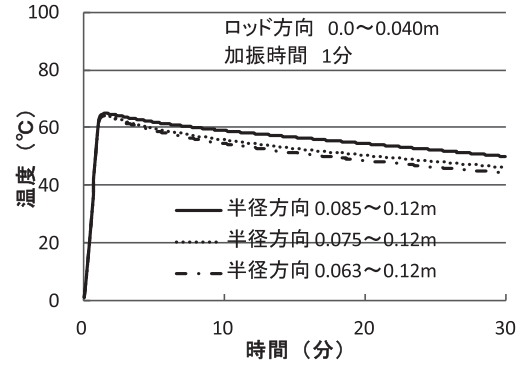


図10 解析結果 (温度勾配の影響)

6.4 発熱部分に温度勾配がある場合

ロッド方向幅を0m ~ 0.015mと短くした場合の解析結果を図9に示す。温度勾配を設けることによりピーク後の温度低下が大きくなっている。これはシリンダー表面から離れたロッドに近い部分の粘性体の温度が低くなっているため、その分、表面温度は低くなっている。ただし、0.085m ~ 0.12mの半径方向幅が0.063m ~ 0.12mの半径方向幅に増えても表面温度の低下はわずかであった。

ロッド方向幅を0m ~ 0.040mと長くした場合の解析結果を図10に示す。ロッド方向幅を広くしたので図6の場合と同様にピーク温度は低くなっている。温度勾配をつけたことによるピーク後の温度の低下状況はロッド方向幅を短くした場合と同じ程度の量となった。

6.5 温度分布図

発熱部分に温度勾配がある場合の図10で示した結果のうち、半径方向幅が0.063m ~ 0.12mの場合の温度分布を図11に示す。加振の終了した1分にはシリンダーの中央表面(図の左上端)は70度と80度の間になっている。その後温度が上昇し、2分には80度と90度間の温度となっている。加振が終了した時点で粘性体の温度が高くなっているため、その熱が表面に伝わっている。しかし4分には約80度となっており、温度が低下しているのがわかる。シリンダーの鋼材部分は熱伝導が進み、表面温度は広い範囲で

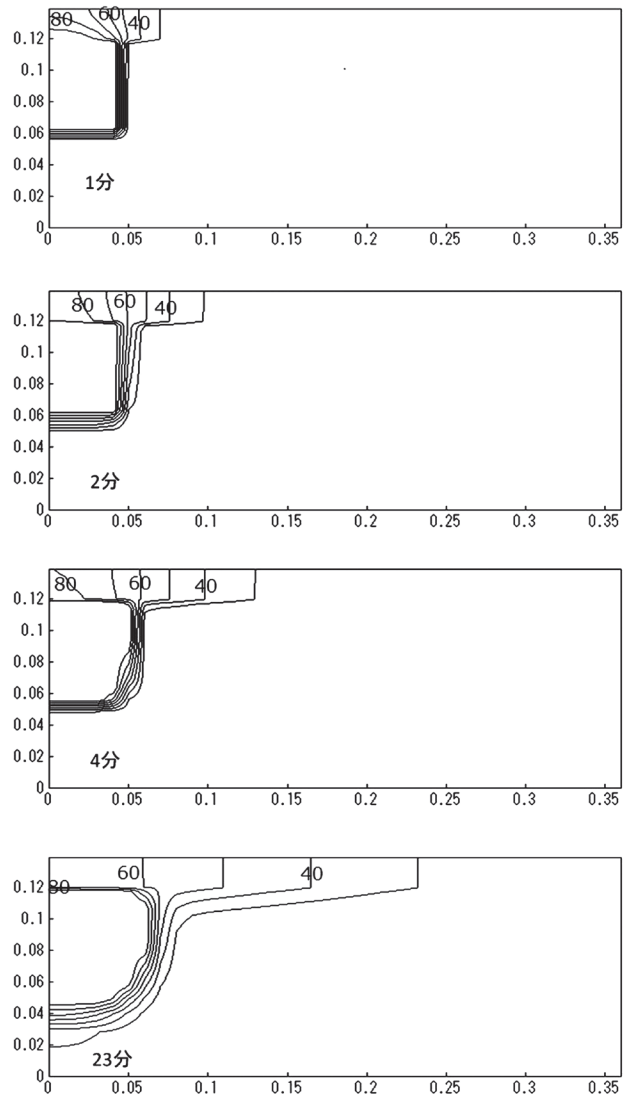


図11 温度分布 温度勾配のある場合
半径方向0.063~0.12m、ロッド方向0~0.04m

高くなっているが、粘性体は温度の伝導が遅く、粘性体の多く部分は30度以下になっている。23分にはシリンダー中央表面の温度は60度から70度の間となっており、さらに温度が低下している。他方、シリンダーの他の部分では温度が高いゾーンが広がっており、鋼材から熱を貰って鋼材近辺の粘性体の温度が上昇している。

7. まとめ

粘性体を用いたシリンダー型制振ダンパーのエネルギー吸収に伴う温度上昇について解析的に検討を行った。前報では簡易な平面座標系を用いての検討であったが、本報では円柱座標系を用いての検討を行っている。加振中はシリンダー中央表面の温度は粘性体のシリンダーに接している部分の温度の影響を受けて上昇し、その後、シリンダー表面ではシリンダーの鋼材部分で熱を伝達し、表面からは空気ですべて冷やされ、粘性体からは熱を供給されその釣り合いの中で温度が変化している。加振の周波数を変化させ、加振の時間を長くすると、その間に熱をシリンダー表面から奪われるので、表面温度は低くなる。また、発熱部分のロッド方向幅を長くすると、発熱部分の温度上昇が抑えられるためシリンダー表面の温度が低くなる。同じく発熱部分を半径方向に広く取ると発熱部分の温度上昇が抑えられるのでシリンダー表面の温度は低くなるが、ロッド幅で発熱部分を広くするよりも温度の低下は少ない。最大温度を経験した後の温度低下の状況を変化させる目的で発熱部分に温度勾配を設けて解析を行った。温度勾配を設けてもシリンダー表面の温度低下の変化はあまり生じないことがわかった。シリンダー内部の温度状況を見ると、粘性体の中での熱伝導が少なく、温度が均質になりにくいことがわかった。

前回の平面座標系で得られた結果とほぼ同じ傾向が円柱座標系を用いても得られた。実験結果との比較を今後計画しており、そのときには円柱座標系を用いた解析が必要となる。そのための予備的な検討がこれらの二つの解析で行えた。

参考文献

- 1) 小西克享：技術資料「Excelによる非定常及び定常伝熱計算」Ver. 4、http://www.sit.ac.jp/user/konishi/JPN/Tech_inform/Pdf/HeatTransferByExcel4.pdf
- 2) 三山剛史：制振建物に用いる粘性体ダンパーのエネルギー吸収に伴う温度上昇に関する基礎的研究、帝塚山大学現代生活学部紀要、第10号、pp.67-74、平成26年2月1日

謝辞：この研究の一部は平成25年度帝塚山大学学術・特別研究費によって行われました。ここに記して感謝いたします。