

# 新しい概念に基づくダンパの開発 (柔軟液体ダンパの発想と研究開発)

中 村 友 道

Development of a Damper based on a New Concept  
(Development and study on flexible liquid damper)

NAKAMURA Tomomichi

## Abstract

A new type of damper called “flexible liquid damper” is being developed. This damper is composed of a flexible ball partially filled with liquid. The important feature of this damper is the surface of the ball moves with the motion of the attached structure followed by the motion of the fluid inside the ball. This fluid-motion gives much energy dissipating effect, which results to a big damping ratio. In this paper, it is introduced how to be developed, and the basic trend of the damper is introduced by shaking tests, both by a pricking and by a shaker test. To compare with the dynamic damper, an analytical explanation is tried, but it is not enough to express the damping value of this damper only with the mechanism of the dynamic damper. It is supposed to have another effect by the fluid motion.

Key Words: Damper, Liquid damper, Damping mechanism, Flexible ball

キーワード：ダンパ，液体ダンパ，減衰メカニズム，柔軟ボール

## 1. 緒 言

世の中にダンパと呼ばれる減衰付与装置は様々なものが考案されており，その原理も様々である<sup>(1)</sup>。本論文で紹介する「柔軟液体ダンパ」は，市販されているものではなく，全くオリジ

ナルな発想に基づくダンパであり、未だにその原理は完全には解明されておらず、当学工学部機械力学研究室の重要研究テーマの一つとして卒業研究や修士論文の対象になっていると共に、人間環境学部の花嶋先生が「ポニョ」と命名して以来、学生にも親しみ易くなって、今年度はオープンキャンパスでの紹介テーマにする等、実用面より宣伝効果が先に歩き始めている状況にある。

そもそも「柔軟液体ダンパ」とは、柔軟性のある袋に液体を詰める事で袋が動きを妨げる効果を持つ性質に基づく減衰付与装置であるが、最初の発想も一つのゴムボールを扱った事に起因する・・・ある日、仕事場の窓辺の棚に小さな水が封入されたゴムボールが置いてあり、それを手で転がしている内に、うまく転がさないと thought ようには動いてくれない事を発見した・・・と言う遠い日の記憶が甦り、筆者が本大学に移って来て学生の卒業研究テーマの選択を考えた時に、一度このゴムボールをダンパとして製品化できないかと考えたのが研究の始まりである。

当初、学生達に指示したのは、図1のように振動する物体と床面の上に水を封入したゴムボールを挟めば物体の振動が低減されるのではないか、と言う点であった。

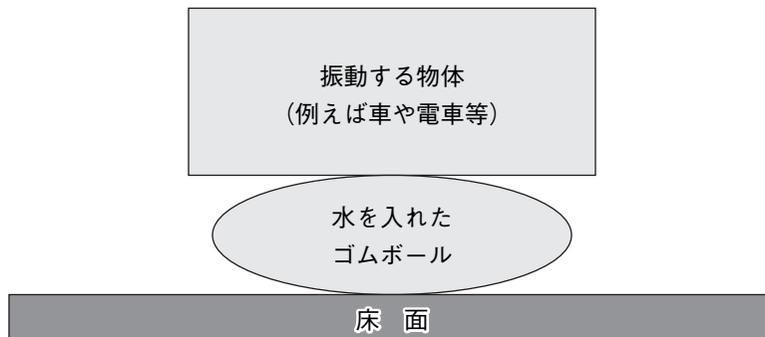


図1 当初目論んだゴムボールの利用方法

しかし、実際に試してみると、ゴムボールは物体の重さで潰れた形になってしまい、ほとんど効果があるようには見えなかったため、次にはゴムボールを振動する物体の上に載荷してみたところ、ある程度の効果が得られそうである事が分かった。

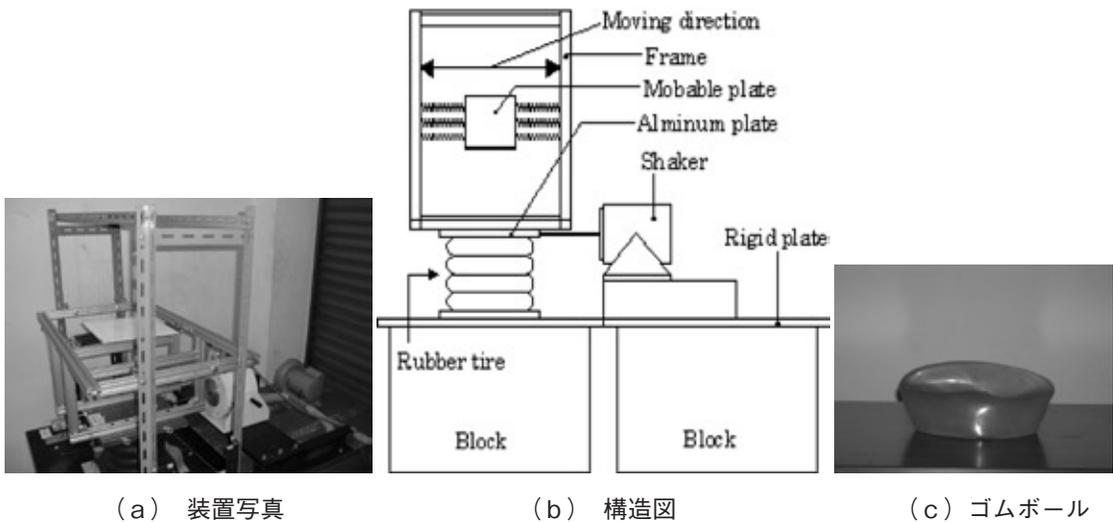
本論文で紹介するのは、まずゴムボール内部の水の量を変化させた場合の驚くべき効果<sup>(2)</sup>と、特別研究費で導入した小型加振装置を使って実施した正弦波加振実験で分かった振動性状による減衰効果の違い、さらにその原因を追究する一環として実施したゴムボール内の水の動きの観察実験であり、最後に解析手法を用いてトレースした現状で可能な解析と現在実施中の今後の研究課題について述べる。

## 2. 実験内容

### (1) 実験装置

実験装置は定盤の上にタイヤチューブ4本、アルミ板、アルミ材で組んだ骨組を順に設置した。振動物体である板材をバネで水平に動くよう支持し、その他の方向に動かないよう骨組と板材をワイヤーで固定した。同様の理由で、骨組も定盤に組んだアングル材に固定して実験装置を作成した<sup>(3)</sup> (図2)。

計測は、板材の上に柔軟液体ダンパと加速度計を設置して実施した。本実験装置はアルミ板を加振器で振動させることで、間接的に板材を振動させることが出来る仕組みであるが、振動物体である板材を手で引っ張って離す「自由減衰振動実験」も実施した。



(a) 装置写真

(b) 構造図

(c) ゴムボール

図2 実験装置

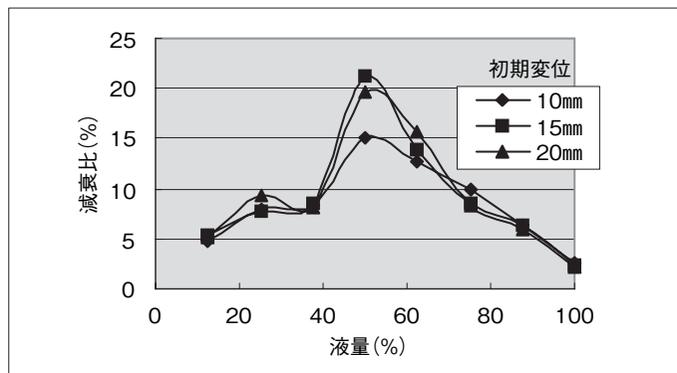
### (2) 自由減衰振動実験と内部水量の影響

自由減衰振動実験は、ボールに液体を満たした時の質量を100%として、12.5%刻みで液量を9ケース変化させ、液量の違いによる減衰の変化を計測した。また、液量を変化させたボールを、液体のみの場合とボールの中に空気を充満させたときとの違いも調べたが、空気は入れない方が高い減衰が得られた。その他、板材に重量を加えることで板材とダンパーの質量比 $\mu$ を変化させた場合や、ばねの種類を変えることで、板材の振動数を変化させて振動数の影響も調べた。なお、質量比 $\mu$ の定義は次式による。

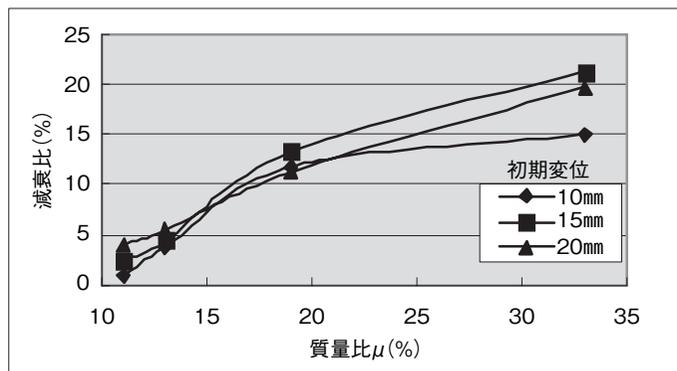
$$\mu = \frac{m}{M+m} \quad (1)$$

ここに、 $m$ ：ダンパの質量、 $M$ ：板材の質量

結果を図3に示すが、図の（a）ではパラメータとした初期変形量10mm、15mm、20mmのいずれの場合も、液量が本来のゴムボール体積の50%の場合に最も大きな減衰が得られる事が分かったため、以降の実験はこれをベースに実施している。また、図3（b）に示すように、初期変形量に関らず、質量比に関しては質量比の増加に連れて減衰比も増加している。なお、通常の動吸振器の場合は $\mu$ は10%以下が目安であるが、実験としては10%より大きなケースのみの実験しか困難な点があり、10%より大きなケースのみの実験でデータ採取している。



(a) 液量の影響



(b) 質量比の影響

図3 自由減衰振動実験の結果

### (3) 正弦波加振実験

図4には支持ばねを変化させて共振振動数を変えた各々の実験モデルに対して正弦波加振実験を行った結果としての減衰比の計測値を示す。モデルはゴムボールの中に直径1cm程度の「浮き」（質量を排除体積分の水とほぼ同程度にしているため、水中を漂う状態にある）を入れたケース（Balloon inside）と何も入れないケース（Ball of 50% water）の2種類を比較している。

実験方法としては正弦波加振の応答結果からハーフパワー法により減衰を求めているが、このゴムボールのサイズでは5Hz程度の物体に対して最も効果があるものの、図4に示す正弦波加振実験の結果は図3の自由減衰振動実験の結果に比べて減衰比の大きさそのものが極端に小さくなっている事が分かった。

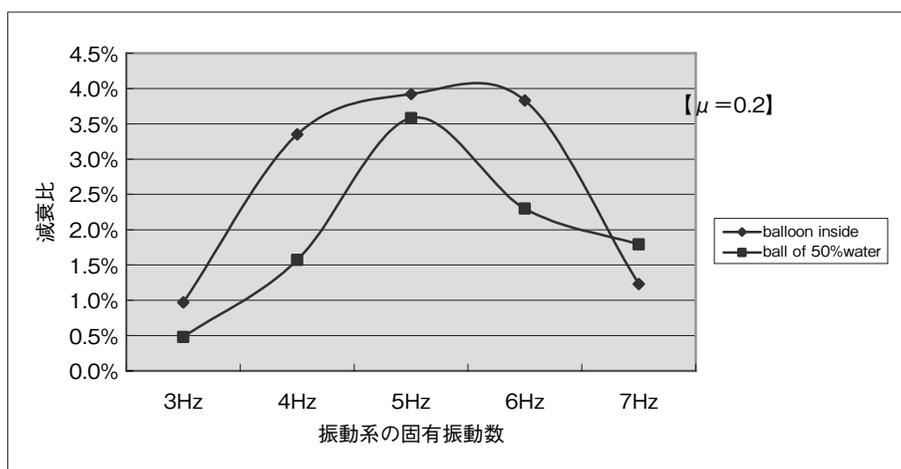


図4 正弦波加振実験結果

### (4) 幾つかのパラメータの検討

ボール自体の剛性を3種類変化（ゴムボールメーカー「カシマヤ製作所」の協力により肉厚の異なるボールを製作してもらった）させると共に、直径150mmと200mmのボールで実験を行い、それぞれの剛性による減衰比の違いを比較した<sup>(4)</sup>。

結果的には、どのボールも振動数と減衰の傾向はほぼ同様の結果であり、図5に示すように、設定振動数3Hz、5Hzのときに大きい減衰が得られ振動数4Hzでは急激に減衰が下がった。また、設定振動数3Hzのときは柔（肉厚薄い）のボールが最も大きい減衰が得られ、振動数5Hzのときは硬い（肉厚太い）ボールが最も大きい減衰が得られた。

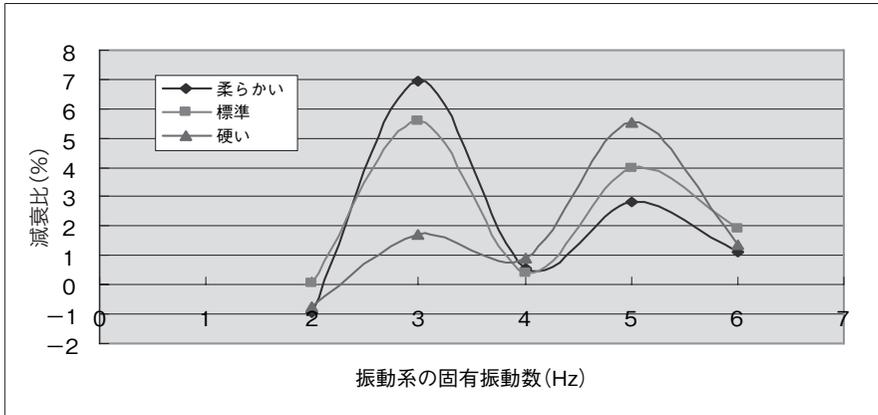


図5 正弦波掃引試験による減衰比の比較 (φ 150mm)

さらに、ボール内の液体を水から粘性の大きいシリコンオイルと粘性の小さいアルコールに変え水のボールと同じ条件で実験を行い比較したところ、図6に示すようにアルコールは大きい減衰が得られたがシリコンオイルの減衰は小さく出た。また、水のケースのみ減衰のピークが2ヶ所あり、他の粘性のボールと設定振動数による減衰の傾向が異なることがわかった。

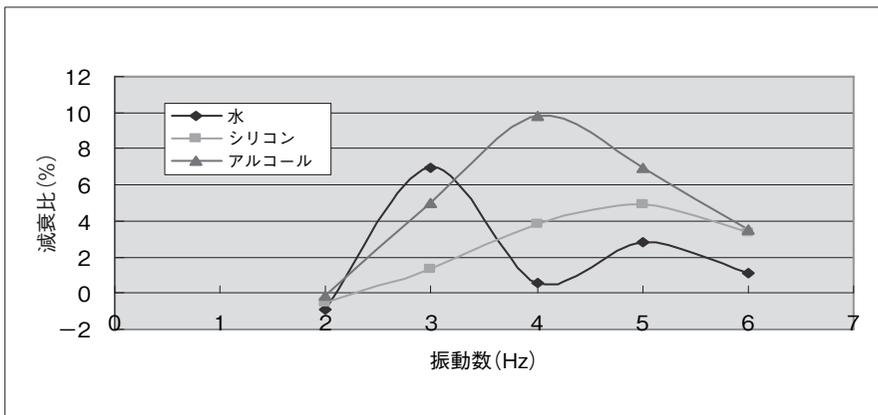


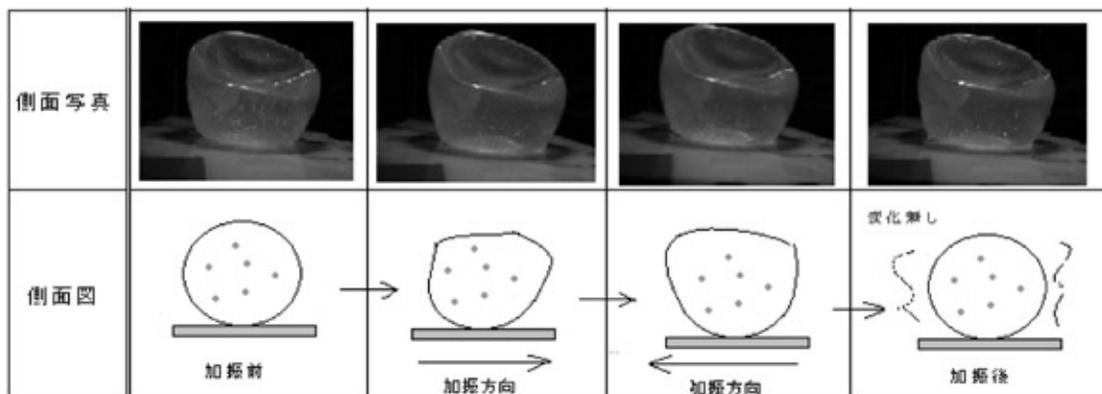
図6 内部液体の種類による減衰比の違い

以上の結果は、本柔軟液体ダンパは動吸振器のように、自身の固有振動数に振動系の固有振動数が最も近い時に効果が大きい事を示している。

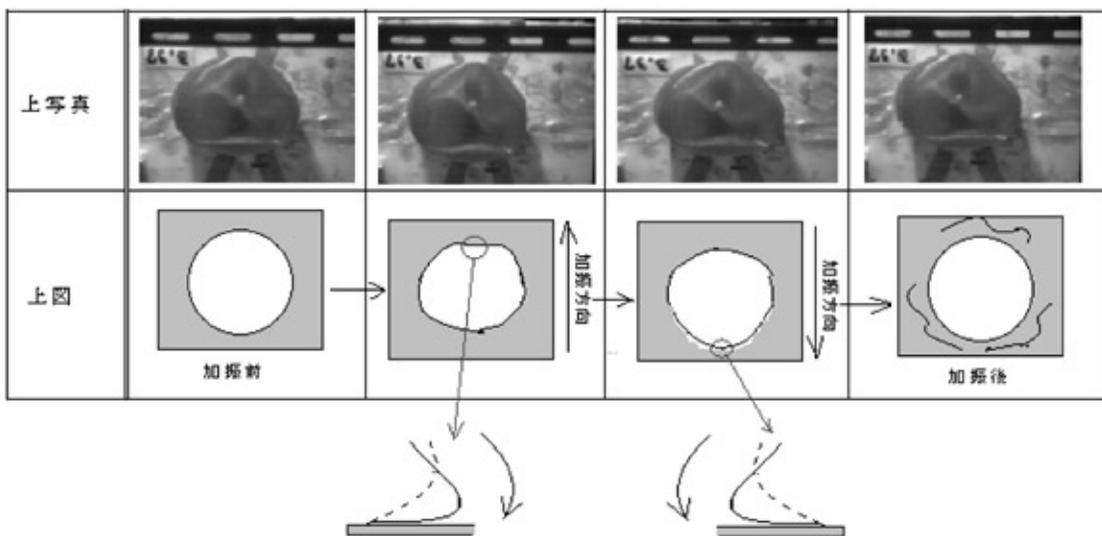
### (5) 可視化実験

ボール内にトレーサーとして蛍光ポリスチレンを入れ実験中の液体の動きを高速デジタルビデオカメラで撮影したが、図7 (a) に示すように正弦波加振試験ではボール内の水は全くと言って良いほど動かなかった。

一方、実験中のボール表面の動きを撮影し比較したところ、図7 (b) に示すように減衰の大きかった3Hz、5Hzのボールはどちらもボール自体の動きが見られた。また、表面の動きを見ると3Hzの柔らかいボールに大きな表面の動きが見られた。



(a) ボール内の液体の動き



(b) ボール表面の動き

図7 正弦波加振試験 (設定振動数3Hz)

### 3. 解析内容

上述のように、系の固有振動数に対して減衰の有効性に差異がある事から、液体柔軟ダンパは一種の動吸振器の効果があると想定されるので、これを確認するために計算ツールSIMULINKを使ったシミュレーション解析を実施した<sup>(5)</sup>。

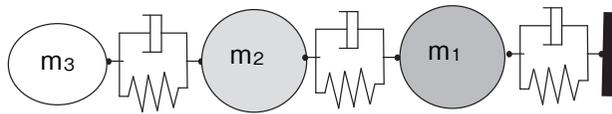
解析モデルは、液体柔軟ダンパの挙動が、ダンパ全体の動きと表面のゴムの動きの2つに分かれているように観察されるため、ダンパ部分を2自由度とし、本体を1自由度系とした合計3自由度の直列系として図8に示すようにモデル化を行った。図8(a)は3自由度系のモデル概念であり、図8(b)はそれをSIMULINKで演算するための計算ループのモデルである。

解析パラメータは、図7に示したボールのケースとし、質量 $m_1=0.83\text{kg}$ の3Hz、1%減衰比のベース台の1自由度系に、質量 $m_2=0.2\text{kg}$ のゴムボールを載荷したケースを計算し、0.01s間に1Nの瞬間的な荷重を与えた時の自由減衰振動波形を求め図9に示した。

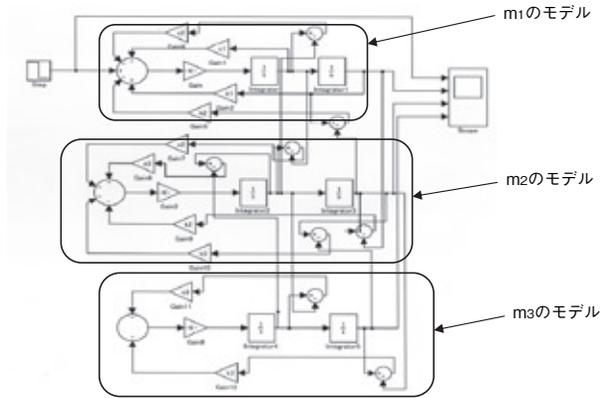
図9(a)は単純な1自由度系の1%減衰の減衰振動であり、(b)、(c)はボールが減衰が無いと仮定した時の振動波形であるが、減衰を無視した動吸振器だけの原理では現実の挙動を表せない事が分かる。しかし図9(d)、(e)のように大きな減衰をボール部分に見込めば実験で得られている波形と似通った波形になることが分かった。

また、図9(f)、(g)に示すようにボール表面のゴムの動きを質量 $m_3=0.02\text{kg}$ 、3Hzの1自由度系として取り入れた3自由度系としたモデル( $m_2=0.18\text{kg}$ とした)では、ゴムもボールも減衰が1%としても減衰波形はかなり実験ケースに近付くが、図9(h)のようにゴム部分を10%とすると実際の動きに良く一致する結果を与える事が分かった。

以上のように、液体柔軟ダンパが持つ大きな減衰効果を確認したが、その特性解明には単なる動吸振器としての動きだけでなく、ボールの中の液体の挙動の精密な分析が必要である事が分かった。この結果は、今後の解析内容への示唆を与えるものではあるが、正確な解析ではなく、今後は大型解析コードを使った解析が必要であるものの、境界が弾性で大変形する問題を解くためには高度な解析技術が必要であり、現在鋭意取り組んでいるところである。



(a) 3自由度モデル



(b) SIMULINKモデル

図8 3自由度系の解析モデル

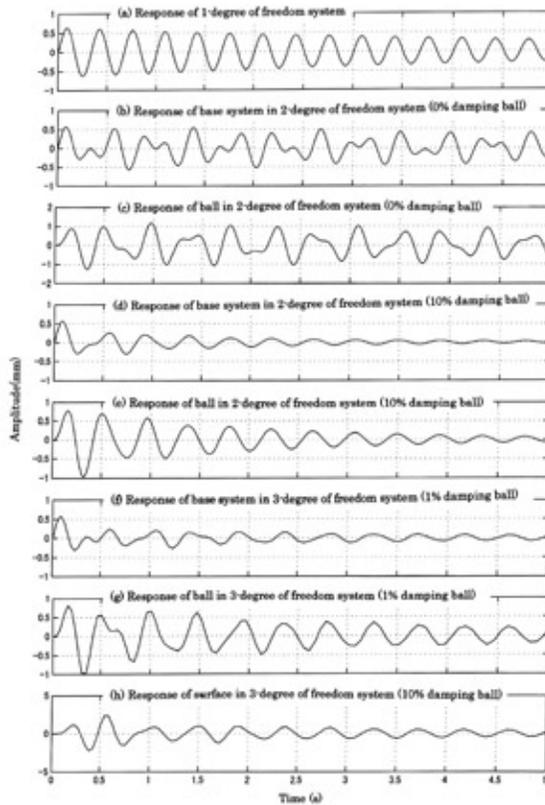


図9 計算結果

## 4. 結 言

小さな思い付きが連鎖反応的に新しい研究テーマに繋がり、それが学生の研究意欲をかきたてる原動力になっている。特に、このような開発研究では、「もの」に触りながらその反応によって新たな発見や試行錯誤に繋がっている。

本研究は身近なテーマからスタートして、ある程度社会の役に立ちそうな成果を得たものの、その原理と応用に関しての課題をクリアしないと研究としては完結しないと言う大学の卒業研究としては適した課題になっていると考えている。

現時点で博士課程前期の学生を含めて3名の学生が本課題に取り組んでおり、彼らの解析意欲は強いが、その困難さは相当なものであり、今後の彼らの努力を期待している。

### [参考文献]

- (1) 制振工学ハンドブック編集委員会「制振工学ハンドブック」, 2008, コロナ社
- (2) 井芹他, 「液体柔軟ダンパーの減衰特性に関する研究」, JSME関西支部卒研発表会, 2006, p.5-11.
- (3) 伊藤他, 「柔軟液体ダンパの改良研究」, JSME関西支部卒研発表会, 2007, p.10-20.
- (4) 中野他, 「柔軟液体ダンパの減衰特性に関する研究」, JSME関西支部卒研発表会, 2008, p.12-7.
- (5) 中村他, 「柔軟液体ダンパの開発に関する研究」, 日本機械学会2007年度年次大会講演論文集(7), pp.111-112.