コロイダルダンパーの強制加熱・自然冷却に関する実験的研究*

Claudiu Valentin SUCIU^{*1}, 木村 勇太^{*2}

Experimental Study on the Forced Heating and Natural Cooling of a Colloidal Damper

Claudiu Valentin SUCIU^{*1} and Yuta KIMURA^{*1} Fukuoka Institute of Technology, Department of Intelligent Mechanical Engineering
3-30-1 Wajiro-Higashi, Higashi-ku, Fukuoka, 811-0295 Japan

Colloidal dampers are able to dissipate large amounts of mechanical energy without significant heating, and such result is surprising since traditional hydro-pneumatic absorbers transform almost integrally the dissipated energy into heat. Trying to get deeper insight into this phenomenon, in this experimental work, using a thermographical method the temperature distributions on the external surface of a colloidal damper are recorded during its forced heating followed by its natural cooling. Employed compression-decompression cylinder is axially divided into two chambers, one of constant volume and the other of variable volume. Silica particles are introduced inside the cavity of fixed volume (silica tank), and a micro-filter is used to separate it by the chamber of variable volume, in which only water is supplied. Two main heat sources are identified as the silica tank (colloidal effect) and the packing used to seal the cylinder (frictional effect). Tests prove that heating/cooling through colloidal effect is much slower than heating/cooling through frictional effect. However, depending on the working frequency, generated heat power through colloidal effect can exceed the generated heat power through frictional effect. Based on the experimentally observed slow speed of heating/cooling through colloidal effect, one suggests that silica tank can be regarded from a thermal standpoint as a thermostat. Mechanism of energy dissipation is justified based on the molecular and cluster vibration modes of the liquid water, variation of the radiation absorption coefficient of liquid water versus the electromagnetic wavelength, and changes in the arrangement of water octamers.

Key Words : Damping, Damper, Thermometer and Internal Combustion Engine, Measurement

1. 結 言

表面エネルギーを発生させる, または表面エネルギーを散逸させるために, 固体・液体・気体の界面 (特に, 固体表面が相手の液体で濡れていない場合) を使用することができる. 従って, このような三相システムはエネルギー貯蔵, エネルギー解放, 並びにエネルギー変換として能力を持っている. あるナノ多孔質材料に適切な液体を組み合わせると, 機械的エネルギーを熱に変換することができ⁽¹⁾ (逆変換も可能である⁽²⁾), さらに, 機械的エネルギーあるいは熱を電気エネルギーに変換することもできる⁽³⁾. 例えば, ナノ多孔質シリカゲルやゼオライトに作動液体として水や水溶液を組み合わせると, 斬新なエネルギー吸収システム (実例: コロイダルダンパー⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾, コロイダルばね⁽⁹⁾など) あるいは斬新な熱機械 (実例: シリカゲルを用いた冷蔵庫など⁽²⁾) を構成することができる. エネルギー吸収システムとして, コロイダルダンパーは面白い熱特性を持っている. 具体的には, 吸収されたエネルギーの大部分を散逸できる吸収器であるが, 長時間で作動させても大きな温度上昇が見られないので, 散逸されたエネルギーの一部だけ熱に変換することが考えられる. そこで, このような散逸現象が「エネルギーのブラックホール」⁽¹⁾, さらに, 「機械的エネルギーの新しい逆説」⁽¹⁰⁾と呼ばれた. このパラドックスを

* 原稿受付 2011 年 9 月 21 日

^{*1} 正員, 福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 (〒811-0295 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1)^{*2} 学生員, 福岡工業大学 大学院 工学研究科 知能機械工学専攻

E-mail: suciu@fit.ac.jp

説明するための一つの提案として⁽¹⁾、コロイダルダンパーの作動サイクルは内部エネルギーを構成している位置エネルギー（分子間相互作用エネルギー）成分の変化に基づく。液圧・空気圧吸収器を含めた通常の熱力学システムの作動は内部エネルギーを構成している運動エネルギー（分子の運動エネルギー）成分の変化に基づくので、コロイダルダンパーの挙動が通常の熱力学システムの挙動に相違することが考えられる。また、コロイダルダンパーの熱力学サイクル（ヒステリシス）は、低作動周波数域で等温、高作動周波数域で断熱、中間程度の作動周波数域で準断熱であることが実験より証明されている⁽¹⁾⁽⁴⁾。そこで、内部エネルギーの位置エネルギー成分が内部エネルギーの運動エネルギー成分より大きくなった場合だけ、位置エネルギー成分に関して変化が可能である⁽¹⁾。このようなコロイダルダンパーの作動条件は次のように考え直すことができる：液体クラスタの直径がある臨界サイズを超えると、内部エネルギーの位置エネルギー成分に関して変化が可能である⁽⁴⁾。一方では参考文献⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾によるコロイダルダンパーの減衰特性・熱特性に関して見かけの反対実験結果を説明するために、温度変動に係している水クラスタ直径分布、疎水化多孔質シリカゲルの細孔直径分布、並びに水分子とシリカゲルの表面で処理していない水酸基との水素結合、といった科学知識を用いて理論的なモデルが提案された⁽¹⁴⁾。他方ではナノ細孔内に水の出入り運動が無摩擦であると見られた⁽⁴⁾ことを説明するために、ナノスケールの粗さを持つ固体表面での滑りの境界条件を用いて古典流体動力学と分子動力学を併用した一般化流体力学の理論を構築した⁽¹⁵⁾。このような観点から考えると、固体・液体・気体の界面が疎水処理分子の頭にジャンプしながら前進・後退するので、ナノスケールで見た流れの不安定性を想像することができる⁽¹⁵⁾。この流体力学モデルを完成させるために、固体表面上で滑りの仮定を用いてシリカゲルのナノ細孔に水が繰り返し吸着・脱着（出入り）する過程に当たって、界面の運動不安定性に関してエントロピー生成の熱力学モデルが提案された⁽¹⁶⁾。従って、低作動周波数域では、固体・液体・気体の界面と環境との間で交換された微小熱量は可逆変化熱量と不可逆変化熱量との総和であることが考えられる。可逆変化熱は、液体の吸着時に吸熱効果を生成し、液体の脱着時に同じ大きさの発熱効果を生成している。これに対して、不可逆変化熱は反対効果を生成する。つまり、液体の吸着時に発熱効果を生成し、液体の脱着時に異なった大きさの吸熱効果を生成している。言い換えると、固体・液体・気体の界面の運動不安定性によって仕事が熱に退化され、環境にエントロピーが生成される。従って、吸着時に加圧仕事の一部が熱に退化され、脱着時に減圧仕事の一部が異なった熱量に退化される。その結果、コロイダルダンパーの散逸エネルギーの一部分だけ熱に変換することが考えられる⁽¹⁶⁾。

最近、コロイダルダンパーの熱特性に関係している説得力のある実験結果が発表された⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾。例えば、作動周波数は 15 Hz の場合、同減衰力及び同ストロークで加振させた油圧ダンパーとコロイダルダンパーの熱特性を調べ、油圧ダンパーの場合は 9 min の間に 55 °C の温度上昇が得られたのに対して、コロイダルダンパーの場合は 30 min の間に 4 °C の温度上昇だけ計測された⁽¹⁷⁾。また、コロイダルダンパーの耐久性実験では赤外線サーモグラフィ装置を用いて作動期間を 2 時間にした場合、ダンパーの外面温度分布の調査より、ダンパーの内部温度と発生熱量が評価された⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。その結果、参考文献⁽¹⁷⁾と同様に油圧ダンパーの散逸エネルギーの大部分が熱に変換するのにに対して、コロイダルダンパーの散逸エネルギーの一部分だけ熱に変換することが見られ、さらに、コロイダルダンパーが安定した減衰特性を有することが判明された⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。このような面白い結果を説明するために、接触角（濡れ）ヒステリシスと、凝着ヒステリシスと、無摩擦状態でのフォノン摩擦現象と、熱表面張力波（リップロン）と、表面散逸メカニズムとの関係を調べ、コロイダルダンパーの散逸エネルギーの一部分が熱エネルギー、残りが音エネルギーや光エネルギーに変換する可能性があるとして論議された⁽²⁰⁾。

耐震・免震装置でよく使用される油圧ダンパーは、温度上昇により急激に性能が低下する問題がある⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。特に平成 23 年 3 月 11 日の震災時には地震が 5 分程度継続したことから熱発生の影響が懸念され、今後はこの問題を解決しなければならない。そこで、コロイダルダンパーでは熱発生が少なく、温度変動に対して安定した減衰特性を有するとのことで、実用化の可能性はある。そのために、コロイダルダンパーの熱特性、散逸エネルギー転化メカニズムをさらに明らかにしなければならない。本研究では、4 時間の加振実験による強制加熱の終了後、1 時間の自然冷却を行ったコロイダルダンパーの実験では赤外線サーモグラフィ装置を用いてシリンダの外面温度分布の調査より発生熱、蓄熱、熱伝達を評価する。以前の研究⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾では一定体積室（コロイド用容器）の軸が横方向、可変体積室の軸が縦方向であったのに対して、本研究では加圧・減圧シリンダの一軸方向に沿って実験部屋を一定体積室と可変体積室に分割する。すると、熱解析が容易で、熱源の箇所、熱発生に係っているコロイドの影響と摩擦の影響が分かりやすくなるといった利点がある。また、加熱・冷却に関してコロイドによる温

度変化・発生熱，摩擦による温度変化・発生熱の割合に及ぼす作動周波数の影響を明らかにする．散逸エネルギー転化メカニズムは，液体水の分子振動モード，液体水のクラスタ振動モード，液体水の放射吸収率と電磁波長との関係，並びに水のオクタマーの配置変化に基づいて説明を行う．

2. 実験装置，実験方法及び材料

コロイダルダンパーの特殊な設計として，図1に示すように，加圧・減圧シリンダを使用し，一軸方向に対して実験部屋を二つの部屋，一定体積室（シリカゲル用容器）と可変体積室に分割する．本実験に使用する疎水化多孔質シリカゲルは，粒子直径 $2R = 10 \sim 70 \mu\text{m}$ （粒子の平均直径： $20 \mu\text{m}$ ），細孔直径 $2r = 1 \sim 40 \text{ nm}$ （細孔の平均直径： 5 nm ），細孔の比表面積 $S_p = 440 \text{ m}^2/\text{g}$ ，細孔の比容積 $V = 550 \text{ mm}^3/\text{g}$ の特性を持ち，有機ケイ素化合物（ C_8H_{17} ）で疎水処理を行ったものである．疎水処理分子の接合密度は $BD = 2 \text{ groups}/\text{nm}^2$ であり，実験に使用するシリカゲル（質量： $M = 8 \text{ g}$ ）を一定体積室に供給する．マイクロフィルタは可変体積室と一定体積室を分割し，一定体積室から疲労破壊したシリカゲル粒子の浸透を防ぐためフィルタのオリフィスの直径は $2R_0 = 2 \mu\text{m}$ のものを使用する．このようなコロイド溶液用容器とフィルタの構造を用いると，応用的な立場より十分な寿命を有するコロイダルダンパーが得られる．コロイダルダンパーの耐久性実験装置・赤外線サーモグラフィ装置を図2，実験データの記録と処理を図3に示す．

Fig. 1 Schematic view of the colloidal damper

Fig. 2 Endurance test rig and infrared thermographical equipment

Fig. 3 Loading and measurement equipment

電動ポンプと制御装置を用いてピストンの周波数 $f=0.5, 1\text{ Hz}$ で上下させると、コロイダルダンパーの振動実験を行うことが可能で、このような加振実験を4時間程度続けると、ダンパーの耐久性実験となる。実験ではダンパーを試験機に設置し、反射防止カバーをかけた後、電動ポンプの油量を制御装置で調整し、加圧・減圧させ、ピストンを往復運動させる。サイクル数が増大すると実験装置に熱が発生し、実験装置の外面では温度上昇が起こる。このように振動のエネルギーが熱に変換した現象を強制加熱という。これに対して、加振実験（強制加熱）の終了後、大気中で自然冷却を1時間程度続けると、実験装置の外面では温度下降が起こる。強制加熱・自然冷却では、縦軸 x に沿って実験装置の外面での温度上昇・下降を赤外線サーモグラフィ装置で記録（図8～12参照）し、式（1）を用いて軸長さ単位における通過熱の計算（図13～15参照）を行い、時間経過に対してダンパーの熱発生量（図18, 19参照）を計算する。

図1に示すように、摩擦力 F_f はピストン速度 $v = \pi S \sin(2\pi ft)$ の逆方向に働く。そこで、荷重 F 、シリンダ内部の圧力 p 、並びに摩擦力の釣り合い方程式 $F = 0.25\pi D^2 p \pm F_f$ では、加圧時の摩擦力にプラスの符号、減圧時の摩擦力にマイナスの符号を付ける。最大加圧時に（ピストン停止の瞬間に）ピストン速度と同時に摩擦力がゼロとなる。その瞬間に発生する最大荷重 $F_{\max}$ は最大圧力 $p_{\max}$ とピストンの断面積だけとの換算 $F_{\max} = 0.25\pi D^2 p_{\max}$ である（ピストン直径は $D = 10\text{ mm}$ である、図1参照）。自動車の懸架装置用コロイダルダンパーを狙った耐久試験では、最大荷重 $F_{\max} = 2.8\text{ kN}$ を一定にしたかったが、加振実験を4時間程度続けると、電動ポンプの圧力が変動してしまう。圧力計で測定した電動ポンプの圧力において変動率は約15%であった。できるだけ長いストロークを得るためには電動ポンプの最大流量下での実験を行った。その結果、加振の0.5 Hz時にストロークは12 mm、ピストンの平均速度（ $v_m = 2Sf$ ）は12 mm/sであったのに対して、加振の1 Hz時にストロークは8 mm、ピストンの平均速度は16 mm/sとなった。

図3に示すように測定機器（赤外線サーモグラフィ装置、FFTアナライザなど）の設定を行い、電動ポンプの最大圧力、油の流量を調整してから実験と同時にデータを記録する。赤外線サーモグラフィ装置（熱画像）、FFTアナライザ（変位計でピストンのストローク S 、ロードセルで荷重 F ）、温度計（反射防止カバーの空間内の環境温度 T_e ）、並びに熱電対・デジタル温度計（シリンダの外面の温度 T 、2箇所）で測定したデータをEXCELでまとめ、MATLABを用いて解析を行う。ヒステリシスループ（ピストンのストロークと荷重との関係グラフ）の面積より、コロイダルダンパーの散逸エネルギー E が得られる。以前の研究⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾と比べて本実験では次のような改善点ができた。

(1) シリンダの一軸方向に沿って実験部屋を一定体積室（コロイド用容器）と可変体積室に分割した。すると、実験装置の測定軸が x 軸だけなので、熱解析が容易で、熱源の箇所、コロイドの影響と摩擦の影響が分かりやすくなるといった利点がある。

(2) 加振実験の期間を1～2時間⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾より4時間まで延長し、コロイダルダンパーの熱特性に及ぼす作動周波数の影響を明らかにするために、ピストンの周波数を0.5 Hz、並びに1 Hzとした。

(3) 4時間の加振実験による強制加熱の終了後、1時間の自然冷却を行った実験では発生熱、蓄熱、並びに熱伝達の評価ができ、さらに、加熱・冷却に関してコロイドによる温度変化・発生熱、または摩擦による温度変化・発生熱の割合に及ぼす作動周波数の影響を明らかにできるような実験装置を設計作成した。

(4) 以前の研究⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾で用いた貸し出しの赤外線サーモグラフィ装置（「Handy Thermo TVS-200EX（測定波長範囲：8～14 μm ）」の代わりに、コンパクトな「Thermo Shot F30W-A01BL（測定波長範囲8～13 μm ）」を購入し、実験を行った。

3. 実験結果

3・1 発生された熱

作動時間： $t = 0 \sim 240\text{ min}$ 、作動周波数 f を0.5 Hz、並びに1 Hzとしたコロイダルダンパーの加振（耐久性）実験では、赤外線サーモグラフィ装置を用いて時間経過に対してダンパーの外面に発生した温度分布（熱画像） T_e を図4、並びに図5に示す。このような加振試験では、実験装置の加熱によって反射防止カバー内の空気の温度上昇が起こるので、環境温度 T_e が22.6 $^{\circ}\text{C}$ から24.7 $^{\circ}\text{C}$ まで（ $f=0.5\text{ Hz}$ の場合）、並びに20.8 $^{\circ}\text{C}$ から23.2 $^{\circ}\text{C}$ まで（ $f=1\text{ Hz}$ の場合）上がった（図11参照）。また、図6は周波数1 Hzの加振実験（強制加熱）の終了後、大気中で1時間程度の自然冷却を行った際の熱画像を示す。冷却では、大気の影響によって反射防止カバー内の空気の

温度下降が起こるので、環境温度 T_F が 23.2°C から 22.7°C まで下がった (図 12 参照). 図 4, 5 より, 実験装置の下部 (油圧アンブ) に熱上昇が見られるが, この熱上昇はポンプや油圧アンブ内に油の流れによる流体摩擦などの影響であると考えられ, コロイダルダンパーの熱発生に関する評価を行うときにはこの影響を無視する. 図 7 のグラフはコロイダルダンパーの縦軸 x に関しての内半径 R_i と外半径 R_e を示したものである. このような幾何学データがダンパーの内部温度分布や自然対流熱伝達を計算するには必要な寸法となる. 図 7 では, 可変体積室の外半径が一部, 20 mm から 15 mm に変化している. これはコロイダルダンパーを組立てるときに必要なスパン用溝を示したものである.

ところで, コロイダルダンパーの自然対流熱伝達に比べて熱伝導, 並びに放射伝熱を無視できる. その理由, ダンパーのピストンと油圧アンブのピストンとの間で熱伝導が起こるはずであるが, 図 4~6 ではダンパーのピストンと油圧アンブのピストンとの間で温度変動がほとんど見られないので, 熱伝導を無視できると考えられる. 放射伝熱 ($Q_{\text{rad}} = A\sigma\epsilon(T_e^4 - T_F^4)$; A はコロイダルダンパーの外面積であり, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ はステファーン・ボルツマン定数であり, ϵ はコロイダルダンパーの平均放射率であり, T_e はコロイダルダンパーの外面温度であり, 並びに T_F は環境温度である.) の計算を行った結果, 自然対流熱伝達に比べて放射伝熱が $100 \sim 1,000$ 倍低い値を示す.

Fig. 4 Temperature distributions on the colloidal damper's external surface (Forced heating during excitation at $f = 0.5\text{ Hz}$)

Fig. 5 Temperature distributions on the colloidal damper's external surface (Forced heating during excitation at $f = 1\text{ Hz}$)

Fig. 6 Temperature distributions on the colloidal damper's external surface (Natural cooling after excitation at $f = 1\text{ Hz}$)

加振周波数を 0.5 Hz , 並びに 1 Hz とした場合, コロイダルダンパーの外面温度分布 T_e を図 8, 並びに図 9 に示す. また, 図 10 は周波数 1 Hz の加振実験 (強制加熱) の終了後, 大気中で 1 時間程度の自然冷却を行った際の外面温度分布 T_e を示す. 図 4~10 より, コロイダルダンパーの主な熱源はシリンダの下部 (パッキン蓋) と一定体積室 (コロイド用容器) であることが分かる. シリンダの下部ではパッキンとピストンとの間の摩擦による温度が著しく上昇するので, 図 8, 9 の温度分布の右側に高いピークが見られる. また, 一定体積室では多孔質シリカゲルのナノ細孔に水が繰り返し吸着・脱着するので, 図 8, 9 の温度分布の左側に比較的低いピークが見られる. さらに, この熱源よりシリンダのラジアル方向だけではなく, シリンダの縦軸方向に沿っても徐々に熱が伝達されることが分かる.

加振周波数を 0.5 Hz、並びに 1 Hz とした場合、作動時間の経過に関してコロイダルダンパーの外面で測定された最大温度（摩擦とコロイドによる外面温度ピーク）を図 11 に示す。同じ図では、作動時間の経過と共に環境温度の変化 T_F が示されている。摩擦及びコロイドによる外面温度ピークの高さは加振周波数、並びに環境温度に関係していると考えられる。本研究では、加熱の 0.5 Hz 時に $T_F = 23.7 \pm 1.1^\circ\text{C}$ 、加熱の 1 Hz 時に $T_F = 22.0 \pm 1.2^\circ\text{C}$ となるので、一定環境温度下での試験を行ったことは判断しにくい。そこで、図 8～11 より周波数が高くなると摩擦による外面温度ピークの高さが増加し、コロイドによる外面温度ピークの高さが減少することが見られるが、環境温度の変動の影響を取り除かないと、周波数の依存性を正確に得られないと考えられる（通過熱の考察を参照）。

Fig. 7 Variation of the test rig's internal and external radii along the vertical coordinate and positions of the main heating sources

Fig. 8 Variation of the test rig's external temperature along the vertical coordinate (Forced heating, $f = 0.5$ Hz)

Fig. 9 Variation of the test rig's external temperature along the vertical coordinate (Forced heating, $f = 1$ Hz)

Fig. 10 Variation of the test rig's external temperature along the vertical coordinate (Natural cooling after forced heating, $f = 1$ Hz)

図 10 を参照すると、作動周波数 1 Hz の加振実験の終了後を行ったコロイダルダンパーの自然冷却では、シリンダ上部のコロイド用容器周辺より時間経過と共に緩やかな温度下降が見られる。逆に、シリンダ下部のパッキン蓋周辺では測定開始から 15 min が経過した時点で急激に温度が低下していることが明らかとなる。作動時間の経過に関してコロイダルダンパーの外面で測定された最大温度（摩擦とコロイドによる外面温度ピーク）を図 12

に示す. 同じ図では, 作動時間の経過と共に環境温度の変化 T_F が示されている. 図 12 の時間軸に対して 0~15 min, 15~40 min, 並びに 40~60 min の範囲では冷却速度 $|\Delta T_{e,\max} / \Delta t|$ を評価した結果, 摩擦による冷却速度は $0.69^\circ\text{C}/\text{min}$, $0.22^\circ\text{C}/\text{min}$, 並びに $0.13^\circ\text{C}/\text{min}$ であったのに対して, コロイドによる冷却速度は $0.15^\circ\text{C}/\text{min}$, $0.12^\circ\text{C}/\text{min}$, 並びに $0.12^\circ\text{C}/\text{min}$ であった. 従って, コロイドによる冷却速度はほぼ一定であるが, 摩擦による冷却速度は 0~15 min の範囲で 4.6 ($0.69/0.15$) 倍の高い値, 15~40 min の範囲で 1.8 ($0.22/0.12$) 倍の高い値, 最後に 40~60 min の範囲でコロイドによる冷却速度と同じ値を示すことが明らかとなった.

円筒壁 (パイプ) の熱通過モデルを用いて実験装置の縦軸における熱伝導の公式,

$$d\dot{Q}_x / dx = 2\pi R_e(x) \bar{h}(x) [T_e(x) - T_F] \quad (1)$$

に図 7 で示した実験装置の外半径を代入し, 軸長さ単位における通過熱を計算した. ここで空気の自然対流熱伝達の係数値 $\bar{h}$ は, シリンダとコロイド用容器の材質 (ステンレス鋼) に関係しているが, 本計算では係数 $\bar{h}$ の縦軸依存性についても考慮した^{(15)(16),(22)~(24)}. その結果, 以前の研究⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾では概算値として $\bar{h} = 16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を使用したが, 本研究では $\bar{h}(x)$ が $5 \sim 15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ の範囲内で変動していることが分かり, 平均値は $11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ となった.

Fig. 11 Variation of the test rig's maximum external temperature at frictional and colloidal peaks, and variation of the environmental temperature versus the working time for forced heating at frequency $f = 0.5$ and 1 Hz

Fig. 12 Variation of the test rig's maximum external temperature at frictional and colloidal peaks, and variation of the environmental temperature versus the cooling time for natural cooling after forced heating at frequency $f = 1 \text{ Hz}$

Fig. 13 Variation of the generated heat power per unit length along the vertical coordinate for forced heating at frequency $f = 0.5 \text{ Hz}$

このように得られた通過熱量の縦軸依存性を図 13 (強制加熱, $f=0.5$ Hz), 図 14 (強制加熱, $f=1$ Hz), 並びに図 15 (自然冷却) に示す. 式 (1) より, 軸長さ単位における通過熱は温度差 $[T_e(x)-T_f]$ に比例するので, 環境温度の変動は通過熱にほとんど影響がないと考えられる. その結果, 摩擦及びコロイドによるピークの高さにおいて加振周波数の依存性を正確に考察できると言える. 図 13 より, 周波数 0.5 Hz で加振実験を行った際にはコロイドの影響によって発生した通過熱量の方が, パッキン部周辺で摩擦の影響によって発生した通過熱量より高いピークを示す. 逆に, 図 14 は周波数 1 Hz で加振実験を行った場合の結果を示しているが, コロイドの影響によって発生した通過熱量よりも摩擦の影響によって発生した通過熱量の方が高いピークが見られる. これは, 時間の経過と共に摩擦に比べてコロイドの働く割合を示していると考えられる. このような割合変化について検討してみると, 作動周波数の 0.5 Hz を 1 Hz に増大したことによりピストンの平均速度の 12 mm/s が 16 mm/s に増加することで摩擦の影響が大きくなり, なおかつストロークの 12 mm が 8 mm に減少することでコロイドの影響が小さくなると考えられる.

Fig. 14 Variation of the generated heat power per unit length along the vertical coordinate for forced heating at frequency $f=1$ Hz

Fig. 15 Variation of the generated heat power per unit length along the vertical coordinate for natural cooling after forced heating at frequency $f=1$ Hz

3・2 散逸エネルギー

周波数 0.5 Hz, 並びに 1 Hz の加振実験を行った際, 図 2, 3 に示すようにロードセルを用いてコロイダルダンパーの最大荷重 $F_{\max}$ を計測し, 最大圧力 $p_{\max} = 4F_{\max}/(\pi D^2)$ を計算した. その結果, 作動時間経過に対して最大圧力の変動が見られ, 周波数 0.5 Hz の場合, 最大圧力の平均値 36.2 MPa, 最大圧力の変動率 16.3 %であったのに対して, 周波数 1 Hz の場合, 最大圧力の平均値 35.0 MPa, 最大圧力の変動率 14.3 %であった. そこで, コロイダルダンパーの最大圧力変動に関して散逸エネルギーの補正を行うために, 散逸エネルギー E [J] と最大作動圧力 $p_{\max}$ [MPa] との関係を調べた (図 16 参照). 図 16 より, 最大作動圧力の増加と共に散逸エネルギーが増加するが, ある最大圧力を超えると増加率が低くなることが分かる. 作動周波数の 0.5 Hz を 1 Hz に増大したことにより散逸エネルギーが減少していった. また, 比較的に高压域ではグラフの勾配が周波数の変化に依存していないが, 比較的に低压域ではグラフの勾配が減少することが見られる. なお, 作動周波数の差異において, 散逸エネルギーと最大圧力との関係を調べて考察を行ったが, 今後の課題として, ストロークの変動などに関しても散逸エネルギーの補正式を明らかにしなければならない.

また, 以前の研究結果より⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾, コロイダルダンパーの温度変動に関して散逸エネルギーの補正式, 従って, 無次元化散逸エネルギー E/E_0 とコロイド用容器の平均作動温度 T [°C] との関係を調べ, 次のような線形近似式が得られた (図 17 参照).

$$E/E_0 = 1 - 0.002084T \quad [-] \quad (2)$$

近似式 (2) は以前の試験体系⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾で得られたものである。しかし、近似式 (2) はコロイド溶液の本質的な特徴を示しており、無次元化散逸エネルギーが試験体系の寸法にほとんど依存しないと考えられる。

3・3 コロイダルダンパーの発生熱と散逸エネルギーとの比率

図 7 に示した $x_{\min} \sim x_{\max}$ 範囲（一定体積室）では縦軸長さ単位における通過熱を積分すると、コロイド影響による発生された熱量を計算し、図 7, 13~15 に示した 0~480 mm 範囲（ダンパーの全長）では縦軸長さ単位における通過熱を積分すると、全体の熱量を計算することができる。そして、全体の熱量からコロイド影響による発生された熱量を引くと、摩擦による発生された熱量が分かり、図 18 に示すように時間経過と共にコロイドによる発生熱と全発生熱との比率変化が明らかとなる。また、図 19 は時間経過と共にコロイダルダンパーの発生熱と散逸エネルギーとの比率変化（コロイドのみの影響、並びにコロイドと摩擦との総和の影響）を示す。

図 18, 19 は作動周波数 0.5 Hz で加振実験を行った際の結果である。図 18 より、コロイダルダンパー全体で発生した熱量に対してコロイドの影響による発生した熱量の最大割合は 26 % 前後であり、120 min 以降では熱平衡状態に近い軌跡を描いたと考えられる。また、図 19 より、120 min 以降ではコロイダルダンパーの散逸エネルギーに対して、全発生熱の割合は 60 % 前後となり、コロイドの影響による発生熱は 18 % 前後となる。この結果は以前の研究で発表された結果⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾と一致している。

Fig. 16 Variation of the dissipated energy versus the maximum working pressure for different values of the frequency

Fig. 17 Variation of the dimensionless dissipated energy versus the colloid's mean temperature

Fig. 18 Variation of the ratio of the colloidal heat to overall heat versus the working time ($f = 0.5$ Hz)

Fig. 19 Variation of the ratio of the generated heat to dissipated energy for $f = 0.5$ Hz (Colloidal and overall effects)

4. 散逸エネルギー転化メカニズムに関する考察

本研究ではコロイダルダンパーの熱特性に関する新しい現象（加熱・冷却と共にコロイドによる温度変化は摩擦による温度変化に比べて非常に緩やかであること）が実験より発見された。これは、コロイダルダンパーの散逸エネルギー転化メカニズムを明らかにするために、大事なヒントであると考えられる。そこで、本節では、液体水の分子及びクラスタの振動モード、液体水の放射吸収率と電磁波長との関係、並びに水のオクタマーの配置変化に基づいて散逸エネルギー転化メカニズムの説明を提案する。

液体水は、水分子及び水クラスタの振動モードと同じ周波数（波長）の光子を射吸・射出できる⁽²⁴⁾ので、コロイダルダンパーの散逸エネルギー及び発生熱は、液体水の放射吸収率に関係していると考えられる。そこで、液体水の分子及びクラスタの様々な振動モードに対応する光子の電磁波長、吸収・放出エネルギー、放射吸収率、並びに電磁波の範囲を表1にまとめた。一部の複合振動モードに、緑色光（波長：0.51 μm ）、オレンジ色光（波長：0.61 μm ）、並びに赤色光（波長：0.66, 0.74 μm ）が対応するので、コロイダルダンパーの散逸エネルギーが光エネルギーに変換することが可能である。他の振動モードは赤外線光子（熱）に対応することが分かる（表1参照）。ところで、面白い現象であるが、水クラスタの水素結合 O-H $\cdots$ O の伸長振動モード（波長：55 μm ）及び曲げ振動モード（波長：200 μm ）はアコースチック・フォノン・モードと重なる⁽²⁰⁾⁽²³⁾⁻⁽²⁷⁾。つまり、電磁的モード（赤外線光子）と機械的モード（アコースチック・フォノン）が重なることで、熱と音の連成振動モードとなる⁽²⁰⁾⁽²³⁾⁻⁽²⁷⁾。この理由で、コロイダルダンパーの散逸エネルギーの一部が熱エネルギー、残りが音エネルギーや光エネルギーに変換する可能性があると論議された⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾。しかし、液体水に対応する光の放射吸収率は極めて低い値（表1参照）を示すので、コロイダルダンパーの散逸エネルギーは光エネルギーに変換する可能性があるが、このエネルギー転化を無視できると考えられる。表1より、赤外線の放射吸収率が高い振動モードは、水分子の対称伸長モード（放射吸収率：30,000 cm^{-1} ）、水分子のねじりモード（放射吸収率：5,000 cm^{-1} ）、水クラスタの伸長モード（放射吸収率：2,000 cm^{-1} ）、並びに水分子の曲げ・はさみモード（放射吸収率：1,500 cm^{-1} ）である。エネルギー転化において、他の振動モードの影響を無視できると考えられる。

Table 1 Wavelength, absorbed/emitted energy, absorption/emission coefficient and electromagnetic range corresponding to various molecular and cluster vibration modes of the liquid water

Vibration mode		Wavelength [μm]	Absorbed/emitted energy [eV]	Absorption/emission coefficient [cm^{-1}]	Electromagnetic range
Type	Denomination				
Molecular	Combined	0.51	2.43	0.0002	Green light
		0.61	2.03	0.0010	Orange light
		0.66; 0.74	1.88; 1.68	0.0026; 0.0084	Red light
		0.84; 0.97; 1.20; 1.47; 1.90	1.48; 1.28 1.03; 0.84; 0.65	0.03; 0.1; 1.5; 50; 10	Infrared
	Asymmetrical stretching	2.87	0.43	45	
	Symmetrical stretching	3.05	0.41	30,000	
	Bending	6.08	0.20	1,500	
	Scissoring	6.08	0.20	1,500	
	Twisting	15.0	0.083	5,000	
	Wagging	25.0	0.050	150	
Cluster	Stretching	55.0	0.022	2,000	Infrared
	Bending	200	0.006	40	

液体水は主に2種類の配置（配置A, B）を有するオクタマー・クラスタより構成されている（図20参照）。液体水の水素結合数を最大化した配置Aの場合は、弱くて、数が多い水分子作用があり、安定性が低くて（位置エネルギーが高い、図21参照）、エントロピーが高いクラスタである。無秩序の傾向が見られるので、配置Aはシリカゲルの細孔の外側に存在する液体水を支配すると考えられる。これに対して、液体水のファン・デル・ワールス作用を最大化した配置Bの場合、強くて、数が少ない水分子作用があり、安定性が高くて（位置エネルギーが低い、図21参照）、エントロピーが低いクラスタである。秩序の傾向が見られるので、配置Bはシリカゲルの細孔の内側に存在する液体水を支配すると考えられる。オクタマーの位置エネルギーのグラフでは、配置Aと配置Bの間にエネルギー・バリアが存在する（図21参照）。

Fig. 20 Arrangements of the water octamer

Fig. 21 Energy absorption and emission during forced heating and natural cooling

ピストンの直径と作動ストロークよりシリカゲルの細孔内に入り出す水量を計算し、水分子数、並びに水のオクタマー・クラスタ数を計算できる。すると、オクタマー・クラスタ 1 個当たりの散逸エネルギーは 0.023eV となる。このクラスタ 1 個当たりの散逸エネルギーは水クラスタの伸長モードに対応するエネルギーに近い値を示す (表 1 参照)。従って、液体水は、水クラスタの振動モードと同じ周波数 (波長: $55\mu\text{m}$) の赤外線光子 (熱) を射吸・射出できるので、オクタマーの配置変更 (配置 A $\leftrightarrow$ 配置 B) に基づいて散逸エネルギー転化メカニズムを説明することができる。具体的に、本実験で得られたコロイドの影響による自然対流熱伝達と散逸エネルギーとの比率値は、周波数 1Hz のときに約 6%、並びに周波数 0.5Hz のときに約 18% であった。この実験結果に関して次のような説明を提案する。加振 (強制加熱) 実験では、発生熱の一部が赤外線光子の形態で水のオクタマー・クラスタの伸長振動モードにより吸収され、オクタマーの配置変化が起こる。つまり、エネルギーを吸収することで、エネルギー・バリアを上昇して安定性が高い (位置エネルギーが低い) 配置 B から安定性が低い (位置エネルギーが高い) 配置 A の方がオクタマーの配置変化が起こる (図 21 の左側)。このメカニズムによってコロイダルダンパーの低い加熱速度を理解できる。自然冷却実験では、吸収されたエネルギーが赤外線光子の形態でオクタマー・クラスタの伸長振動モードにより放出され、オクタマーの配置変化が起こる。従って、エネルギーを解放することで、エネルギー・バリアを下降して安定性が低い (位置エネルギーが高い) 配置 A から安定性が高い (位置エネルギーが低い) 配置 B の方がオクタマーの配置変化が起こる (図 21 の右側)。このメカニズムによってコロイダルダンパーの低い冷却速度、またはサーモスタットのような挙動を理解できる。

5. 結 語

本研究ではコロイダルダンパーの熱特性に関して調査を行った。具体的に、4 時間の加振実験による強制加熱の終了後、1 時間の自然冷却を行ったコロイダルダンパーの実験では、赤外線サーモグラフィ装置を用いてシリンドラの外面温度分布の調査より発生熱、蓄熱、熱伝達を評価することができた。熱源はコロイド用容器部周辺 (コロイドの影響) とパッキン部周辺 (摩擦の影響) であり、この熱源よりシリンドラのラジアル方向だけではなく、シリンドラの縦軸方向に沿っても徐々に熱が伝達されることが分かった。また、加熱・冷却と共にコロイドによる温度変化は摩擦による温度変化に比べて非常に緩やかであることが分かった。観察結果に基づき、コロイド用容器部は熱力学の観点よりサーモスタットと見なすことができる。コロイドによる発生熱と摩擦による発生熱の割合は作動周波数に依存した。例えば、周波数 0.5Hz で加振実験を行った際にはコロイドの影響によって発生した通過熱量の方が、パッキン部周辺で摩擦の影響によって発生した通過熱量より高いピークを示した。これに対して、周波数 1Hz で加振実験を行った場合、コロイドの影響によって発生した通過熱量よりも摩擦の影響によって発生した通過熱量の方が高いピークが見られた。このような割合変化について検討した結果、作動周波数が高くなったことによりピストンの平均速度が増加することで摩擦の影響が大きくなり、なおかつコロイダルダンパーのストロークが減少するのでコロイドの影響が小さくなることが明らかとなった。

液体水の分子及びクラスタの振動モード、液体水の放射吸収率と電磁波長との関係、並びに水のオクタマーの配置変化に基づいてコロイダルダンパーの散逸エネルギー転化メカニズムの説明を提案した。この散逸エネルギー転化メカニズムを完全に確認するために、今後の実験的研究の精度を高めたい。例えば、コロイドの無い場

合の摩擦力（減衰力へのコロイドの寄与率）、摩擦係数の振幅や振動数依存性を含めた評価を行いたい。また、摩擦による温度変化とコロイドによる温度変化の差異について、摩擦の方が局所的であったため、結果的に温度変化の勾配が大きかったようにも考えられるので、形状や構造的な要素にも着目したエネルギー転化メカニズムの理解を深めたい。

6. 記号の説明

A	コロイダルダンパーの外面積 [m^2]
A	水素結合数を最大化した水クラスタ（オクタマー）の配置
BD	シリカゲルの疎水处理分子の接合密度 [group/nm^2]
B	ファン・デル・ワールス作用を最大化した水クラスタ（オクタマー）の配置
$d\dot{Q}_x/dx$	縦軸長さ単位における通過熱出力 [W/m]
D	コロイダルダンパーのピストン直径 [m]
E	散逸エネルギー [J]
E_0	0°C のときの散逸エネルギー [J]
f	周波数 [Hz]
F	荷重 [N]
F_f	摩擦力 [N]
$F_{\max}$	最大荷重 [N]
$\bar{h}$	自然対流熱伝達の係数 [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
M	シリカゲルの質量 [kg]
p	圧力 [Pa]
$p_{\max}$	最大圧力 [Pa]
Q	発生熱（自然対流熱） [J]
Q_{rad}	放射伝熱 [J]
r	シリカゲルの細孔半径，水クラスタ間距離 [m]
R	シリカゲル粒子の半径 [m]
R_0	フィルタのオリフィスの半径 [m]
R_e	コロイダルダンパーの外半径 [m]
R_i	コロイダルダンパーの内半径 [m]
$S = \Delta x$	ピストンのストローク [m]
S_p	シリカゲルの細孔の比表面積 [m^2/g]
t	時間 [s]
T	温度 [$^\circ\text{C}$, K]
T_e	コロイダルダンパーの外表面温度 [$^\circ\text{C}$, K]
$T_{e,\max}$	コロイダルダンパーの最大外表面温度 [$^\circ\text{C}$, K]
T_F	環境温度 [$^\circ\text{C}$, K]
U	位置エネルギー [J]
v	ピストン速度 [m/s]
v_m	ピストンの平均速度 [m/s]
V	シリカゲルの細孔の比容積 [mm^3/g]
x	実験装置の縦軸 [m]
$x_{\max}$	縦軸における最大値 [m]
$x_{\min}$	縦軸における最小値 [m]
ε	放射率 [-]
σ	ステファン・ボルツマン定数 [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$]

文 献

- (1) Eroshenko, V.A., "Heterogeneous Structure for Accumulation or Dissipation of Energy: Process to Use it and Associated Devices", *International Patent*, WO 96/18040 (1996), pp. 1-20.
- (2) Eroshenko, V.A., Regis, R.C., Soulard, M., and Paterin, J., "Energetics: A New Field of Applications for Hydrophobic Zeolites", *Journal of American Chemical Society*, Vol. 123 (2001), pp. 8129-8130.
- (3) Qiao, Y., "Nanoporous Materials for Use in the Conversion of Mechanical Energy and/or Thermal Energy into Electrical Energy", *International Patent*, WO 2007/022456 A2 (2007), pp. 1-18.
- (4) Suciu, C.V., "Investigation on the Colloidal Damper", *Ph. D. Thesis, Kobe University* (2003), pp. 1-172.
- (5) Suciu, C.V., Iwatsubo, T., and Deki, S., "Investigation of a Colloidal Damper", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 259 (2003), pp. 62-80.
- (6) Suciu, C.V., Iwatsubo, T., and Deki, S., "Novel Principle of Mechanical Energy Dissipation; Part 1: Static Performances of Colloidal Damper", *JSME International Journal*, Vol. C47 (2004), pp. 180-188.
- (7) Suciu, C.V., and Iwatsubo, T., "Novel Principle of Mechanical Energy Dissipation; Part 2: Dynamic Performances of Colloidal Damper", *JSME International Journal*, Vol. C47 (2004), pp. 189-198.
- (8) Qiao, Y., "Use of Chemical Admixtures as Promoters, Recovery Agents, and Viscosity Adjustors in Nanoporous Energy Absorption Systems", *International Patent*, WO 2007/044030 (2007), pp. 1-28.
- (9) Trzpit, M., Soulard, M., and Patarin, J., "The Pure Silica Chabazite: A High Volume Molecular Spring at Low Pressure for Energy Storage", *Chemical Letters*, Vol. 36 (2007), pp. 980-981.
- (10) Eroshenko, A.V., "A New Paradigm of Mechanical Energy Dissipation; Part 1: Theoretical Aspects and Practical Solutions", *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 221 (2007), pp. 285-300.
- (11) Coiffard, L., Eroshenko, V.A., and Grolier, J.P.E., "Thermo-mechanics of Variation of Interfaces in Heterogeneous Lyophobic Systems", *AIChE Journal*, Vol. 51 (2005), pp. 1246-1257.
- (12) Coiffard, L., and Eroshenko, V.A., "Temperature Effect on Water Intrusion/Expulsion in Grafted Silica Gels", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 300 (2006), pp. 304-309.
- (13) Kong, X., and Qiao, Y., "Thermal Effects on Pressure-Induced Infiltration of Nanoporous Systems", *Philosophical Magazine Letters*, Vol. 85 (2005), pp. 331-337.
- (14) Suciu, C.V., "Thermal Effects on Nano- Energy Absorption Systems", *ASME MICRO-NANO*, CD-ROM (2008), pp. 23-32.
- (15) Suciu, C.V., Iwatsubo, T., Yaguchi, K., and Ikenaga, M., "Novel and Global Approach of the Complex and Interconnected Phenomena Related to the Contact Line Movement Past a Solid Surface from Hydrophobized Silica Gel", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 283 (2005), pp. 196-214.
- (16) Suciu, C.V., "Entropy-Based Design of Liquid-Repellent Nanochannels Destined to Energy Absorption Systems", *ASME ICNMM*, CD-ROM (2009), pp. 1-9.
- (17) Zhou, G., and Sun, L., "System of Smart Colloidal Dampers with Controllable Damping Curves using Magnetic Field and Method of using the Same", *Patent*, US 2008/0135361 A1 (2008), pp. 1-6.
- (18) Suciu, C.V., 谷真悟, 三好健太, "コロイダルダンパーの熱特性に関する実験的研究", *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 76, No. 765 (2010), pp. 1043-1049.
- (19) Suciu, C.V., Tani, S., and Miyoshi, K., "Experimental Study on the Thermal Characteristics of a Colloidal Damper", *JSME, Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 4, No. 6 (2010), pp. 899-913.
- (20) Suciu, C.V., and Goto, H., "Interconnection between the Contact Angle (Adhesion) Hysteresis, Slippage on a Nanorough Solid Wall and Phononic Friction", *Tribology International*, Vol. 43, No. 5-6 (2010), pp. 1091-1098.
- (21) Suciu, C.V., Kimura, Y., and Tani, S., "On the Generated Heat at Advancing/Receding of Water on Surface Engineered Nanoporous Silica", *Advanced Materials Research*, Vols. 123-125 (2010), pp. 1003-1006.
- (22) Kays, W., Crawford, M., and Weigand, B., "Convective Heat and Mass Transfer", *McGraw-Hill* (2004), pp. 1-298.
- (23) Chen, G., "Nanoscale Energy Transport and Conversion", *Oxford University Press* (2005), pp. 1-531.
- (24) Zhang, Z.M., "Nano/Microscale Heat Transfer", *McGraw-Hill* (2007), pp. 1-479.

- (25) Walrafen, G.E., and Pugh, E., “Raman Combinations and Stretching Overtones from Water, Heavy Water and NaCl in Water at Shifts to ca. 700 cm^{-1} ”, *Journal of Solution Chemistry*, Vol. 33 (2004), pp. 81-97.
 - (26) Yakovenko, A.A., Yashin, V.A., Kovalev, A.E., and Fesenko, E.E., “Structure of the Vibrational Absorption Spectra of Water in the Visible Region”, *Biophysics*, Vol. 47 (2002), pp. 891-895.
 - (27) Gaiduk, V.I., Nielsen, O.F., and Crothers, D.S.F., “Molecular Theory of Low-Frequency Raman Spectrum of Water in the Translational Band Region”, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 137 (2008), pp. 92-103.
-