

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19360111

研究課題名(和文)

新しいエネルギー消散原理を用いたダンパ(コロイダルダンパ)の開発研究

研究課題名(英文)

Development of colloidal damper using new energy dissipation principle

研究代表者

岩 壺 卓 三 (IWATSUBO TAKUZO)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：00031097

研究成果の概要(和文)：

コロイダルダンパは新しいメカニズムによるダンパで、体積当りの減衰力が大きい事と、振動速度に依存しない減衰力が発生する特徴を持っているために将来有望なダンパである。本研究ではその特性を左右するシリカゲルの寸法と疎性材料の種類に対する特性を明らかにし、次にダンパの振動と衝撃特性を明らかにした。またコロイダルダンパの設計に対して、定常振動の場合と衝撃に対するダンパの形状の設計法について提案した。

研究成果の概要(英文)：

Colloidal damper is a damper which used a new physical mechanism and its characteristics is that the force per damper volume is large and the damping force is not depend on vibrating velocity. So this damper may become useful in the future. This paper studied between the damping characteristics and size of silica-gel and the kind of hybolic material. Next design procedures of the colloidal damper are proposed for steady state vibration and impact force.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2008年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：機械力学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：ダンパ，コロイダルダンパ，疎水性シリカゲル，水・グリセリンホルムアミド，接触角ヒステリシス，分子動力学シミュレーション，静特性・動特性

1. 研究開始当初の背景

コロイダルダンパは小形高効率のダンパが作れるという特徴がある。しかし現在行われているコロイダルダンパの開発研究では、振動振幅が比較的小さい場合(0~10mm)の往復動の開発研究を行っている。ところが現実では自動車の衝突の時や、原子力発電用機器が地震荷重を受ける場合には振幅を大きく、大きなエネルギーを緩和する必要がある。

このような場合に対応できるダンパとして衝撃荷重や、大きなストローク、大荷重に対するダンパの追加研究を行う必要が生じた。また分子動力学によるシミュレーションでは気体、液体、固体が関連するモデルであるので、分子動力学の手法として新しい研究課題が発生してきた。この様なことから継続するテーマと新しいテーマを合わせて研究を継続することが必要である。

2. 研究の目的

- (1) 自動車用小形状高性能ダンパの開発.
- (2) 自動車の衝突時の衝撃緩和装置としてのダンパの研究開発.
- (3) 原子力発電用蒸気発生器, 配管等および建築物の制振に用いられるような50~200tonの力に対応できる大容量コロイダルダンパの研究・開発.
- (4) コロイダルダンパとオイルダンパの特徴を利用した新しいハイブリッドダンパの研究開発.
- (5) 理論的研究として分子動力学を用いた細孔内のシミュレーション手法の開発.

3. 研究の方法

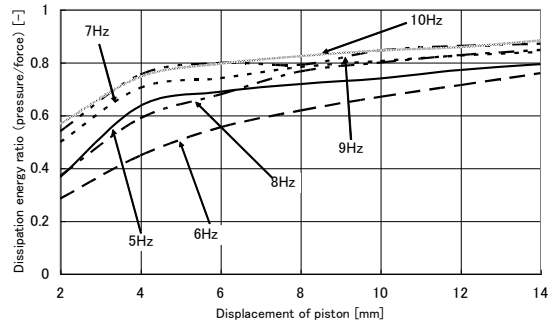
- (1) コーティング材料の実用化のためのくり返し実験を行い, 耐久性, 耐圧性をさらに調べると共に, コスト, 製作性などの評価の下で最適なコーティング材料の最終決定を行った.
- (2) ダンパメカニズムとして, シングルシリンダーの場合でシリカゲルの耐久性の観点からシリカゲルがピストンとシリンダーの間にはさまって破損しないようなメカニズムに改良した場合のコロイダルダンパの動特性実験を行う. さらにオイルダンパとの特性比較を行い, 両ダンパの特徴を明らかにした.
- (3) 自動車の一輪をモデル化したダンパシステムの実験を行い, 調和振動及びランダム振動に対する実験結果を得た.
- (4) コロイダルダンパに応用できる相似則を作り, それを基に大容量衝撃試験も可能なように設計し, 自動車の前面衝突時の緩衝装置を想定して, 時速50km/hまで実験できる大容量のロングストロークのコロイダルダンパの設計及びそれを実験できる実験装置の設計と製作を行い, 衝撃に対するダンパの効果を調べた.
- (5) 分子動力学の手法を用いて細孔内に水が進入・進出する時の水と空気との境界の様子を実現し, 先ず水の細孔内への進入時の接触をシミュレーションによって求める. また, 分子単位で考えると, シミュレーションには多くの分子が必要なので, 計算時間がかかる. この問題を解決するために, いくつかの分子をまとめて一つのユニットと考えて解析する手法を提案する. 次にコロイダルダンパとして使用する時に散逸エネルギーを大きくするためにヒステリシス曲線の面積を大きくするような細孔直径とコーティング材の関係を求め, 効率の高い材料の条件を求めた.

4. 研究成果

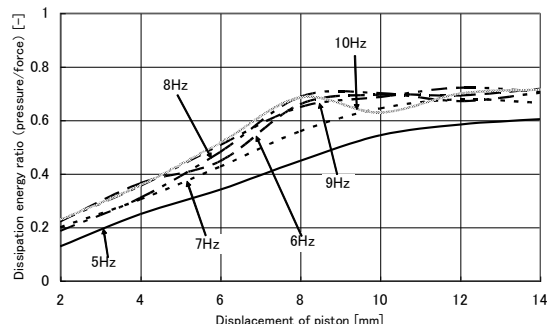
- (1) コロイダルダンパの動特性の実験的解析

本研究ではコロイド溶液が直接ピストンに触れない構造のコロイダルダンパを新しく開発設計し. この装置を用いてシリカゲルと水で出来るコロイドの容積比, コロイドの容量を変えたダンパについてその動特性を調べ, 最適なシリカゲルの量, 濃度を調べる. また, コロイダルダンパと, 一般に使用されているオイルダンパを実験的に比較し, その特性の長短を明らかにした.

図1にピストンの変位と散逸エネルギーの比の関係を示す. この関係により, コロイダルダンパとしてどの程度のエネルギー散逸ができるかがわかる. まず, 初期圧力4MPaの場合, ピストンの変位量が4mm程度までは散逸エネルギーの比は上昇し, 6mm以上はほぼ一定の値に収束している. 12MPaの場合はピストンの変位量が8mm程度までは散逸エネルギーの比は上昇し, 10mm以上はほぼ一定の値に収束する. 初期圧力12MPaの場合, 初期圧力4MPaの場合より高い圧力を発生するため, シールの摩擦による散逸の割合が大きくなる. 今までの研究より, 初期圧力を高くすることにより, 散逸エネルギーは大きくなり, コロイドによる散逸エネルギーも増えるが, シールによる散逸を含めた全体の散逸エネルギーに対するコロイド散逸エネルギーの割合は低下する.



(a) Pre pressure 4MPa



(b) Pre pressure 12MPa

図1 Dissipation energy ratio versus frequency (Cylinder volume, 6000mm³ silica gel weight, 1g)

図2に加振周波数とピストンの単位断面積当たりの散逸エネルギーの関係を示す。初期圧力4MPaについて、このことよりオイルダンパの減衰力は速度に依存しているが、コロイダルダンパの減衰力は細孔内の往復の接触角に依存し、速度とは直接関係がないことを示している。

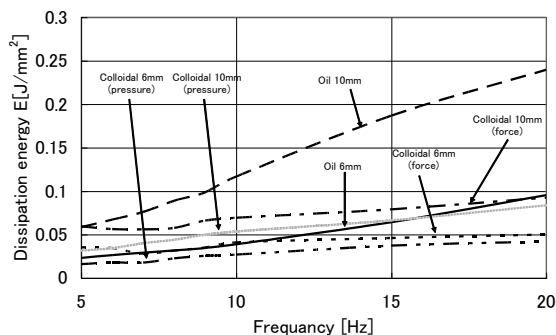


図2 Dissipation energy versus frequency

図3に、加振周波数20Hz、ピストンの変位量8mmで約5分加振したときの時間と散逸エネルギーの比の関係を示す。この結果、オイルダンパは30秒ごとの結果を取得した。オイルダンパは時間に対して急激に性能が低下していき、単位時間に入力されるエネルギー量が高いため、シリンダー表面温度が70°C程度に達した。それに対しコロイダルダンパは同条件の試験において性能はほとんど変化しなかった。

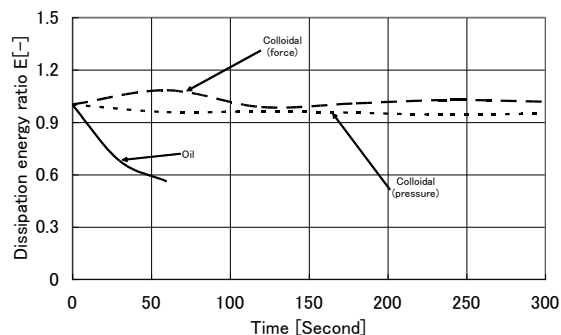


図3 Dissipation energy ratio versus time (Frequency, 20Hz displacement of piston, 8mm)

結果をまとめると以下のようなものである。

- ① シリカゲルと水で出来るコロイドの容積比が減衰性能に及ぼす影響は、コロイドのシリカゲル濃度を高くすると減衰性能が高くなる。
- ② 使用するシリカゲルの容量が減衰性能に及ぼす影響は、使用するシリカゲルの容

量を多くすると減衰性能が高くなる。

- ③ シリンダー体積が減衰性能に及ぼす影響は、シリンダー体積を小さくすると減衰性能が高くなる。

次に、コロイダルダンパと、一般に使用されているオイルダンパを実験的に比較し、以下のことが明らかになった。

- ④ 減衰性能に対する速度の依存性は、コロイダルダンパはオイルダンパに比べ、減衰性能は加振周波数にほとんど依存しない。
- ⑤ 長時間の連続的加振に対する性能は、オイルダンパは長時間の連続加振を与えると、急激に性能が低下していくのに対し、コロイダルダンパは長時間の連続的加振を与えてもほとんど性能が変化しない。

(2)分子動力学による細孔内の流動シミュレーション (最適細孔の決定)

分子動力学シミュレーションを直接行えば、計算が不能となる程、多くの分子が必要となるため、いくつかの分子を1つにまとめたモデル (United Molecule Model) を考案し、それに対応するレナードジョーンズポテンシャルを図4のように求め、その有用性を調べた。また、水分子の電荷の影響を考慮に入れた場合に、疎水化表面上への水分子の吸着エネルギー、ならびに、疎水化ナノ細孔内を水クラスタが流動しているときのメニスカスのエネルギーを解析し、シリカゲルの細孔径、疎水処理材料の違いが散逸エネルギーに及ぼす影響を調べた。そしてコロイダルダンパとして、最もエネルギーを散逸できる細孔径、疎水処理材料の組み合わせについて検討した。本研究により得られた結果を以下に示す。

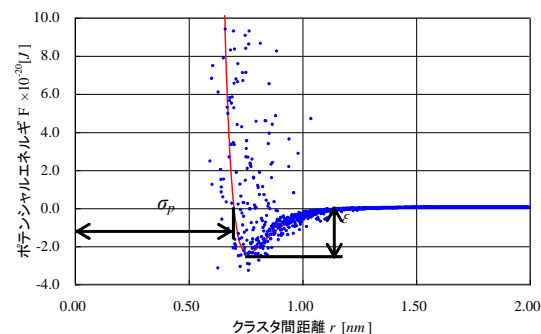


図4 UMモデル間のポテンシャルエネルギー

- ① United Molecule モデルは、集合体として考えられた分子が運動していると仮想的に見なすことにより、従来と同様の方法で系を制御できることをシミュレーションにより示し、計算時間を大幅に短縮できることがわかった。
- ② 細孔径が大きくなれば吸着エネルギーも

大きくなり、疎水処理材料に対する吸着エネルギーは疎水率に依存していることがわかった。ただし、100[%]疎水処理の場合では、細孔径が大きくなれば吸着エネルギーは小さくなり、十数ナノメートルオーダーでは C4 が最適で、細孔径の拡大とともに、最適なもの C18 へと移っていくことがわかった。(図 5)

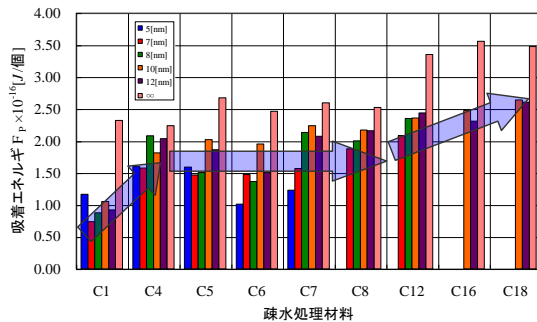


図 5 疎水化表面での水分子の濡れシミュレーション結果(エンドキャッピングあり)

- ③ 細孔径が大きくなるにつれ、流動中の水クラスタのメニスカスのエネルギーは大きくなりながら飽和することがわかり、電荷による影響を考慮に入れれば、前進と後退のエネルギー差は小さくなっていくと考えられる。(図 6)

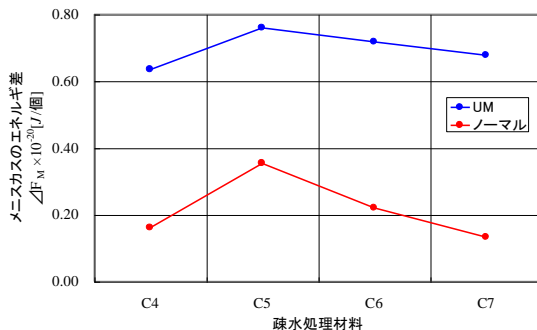


図 6 ノーマルモデルと UM モデルにおけるメニスカスのポテンシャルエネルギーの比較 (d=5[nm], C4~C7-エンドキャッピングあり, 第 1 回目のヒステリシスを想定の場合)

- ④ 水分子が疎水処理材料から受ける力は非常に小さく、疎水処理材料の長さ、疎水率、細孔径が散逸エネルギーに大きな影響を与えることがわかった。疎水処理材料として C1 を配置した場合、長さが短いため、水分子によって簡単に疎水処理材料が覆われ、その結果、疎水処理材料としての効果が得られなくなると考えられる。
- ⑤ コロイダルダンパとして、最もエネルギーを散逸する細孔径、疎水処理材料の組み合わせは、実用的なもの考えると、

「d=4.13[nm]-疎水処理材料 C6-エンドキャッピングあり」のものであると考えられる。しかし、細孔径については使用する条件下でのシリンダー内の圧力によって、細孔径の選定も変わる。

(3) 衝撃時のダンピング性能

コロイダルダンパの衝撃吸収機構としての乗用車衝突を模擬したコロイダルダンパの衝撃実験装置を設計、製作し、衝撃実験を行った。そのためにコロイダルダンパとしての性能が問題であるので、巨視的な性質を表す運動エネルギー、散逸エネルギーを導入した相似則を導出した。

次に実験ではピストン径 14mm, 30mm のピストンについて実験を行った。図 7, 8 にピストン径 14mm と 30mm の場合で、落錘高さと疎水化シリカゲルの質量により、エネルギー吸収率がどのように変化するかを示す。

これらの図から疎水化シリカゲルの質量が多いほどエネルギー吸収率の低下が少なくなっており、効率の良いコロイダルダンパとなることがわかる。したがって、コロイダルダンパを衝撃吸収機構として用いるためには疎水化シリカゲルの質量を多くし、最大動作圧力を 30~35[MPa]以下にする必要がある。

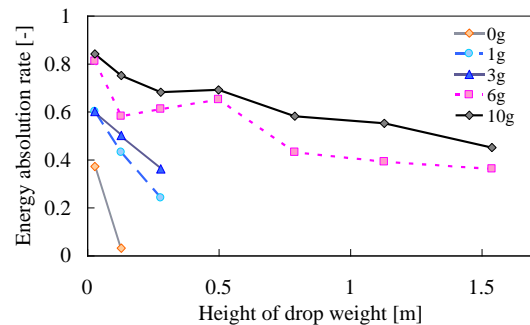


図 7 Impact test result of the height of drop weight vs. energy absorption rate (Drop weight 25[kg], Piston diameter 14 [mm])

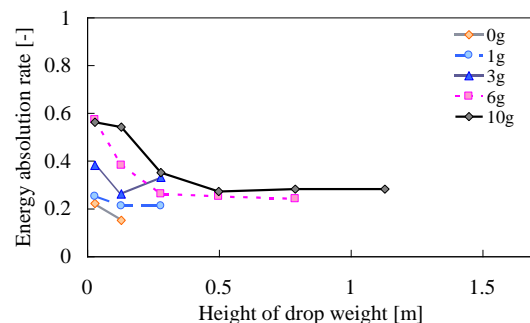


図 8 Impact test result of the height of drop weight vs. energy absorption rate (Drop weight 25[kg], Piston diameter 30 [mm])

次にコロイダルダンパの衝撃に対する特性を明らかにするために、ピストン径、疎水化シリカゲルの質量、衝突物体の運動エネルギーを変化させ、エネルギー吸収率、コロイダルダンパの動作圧力、ヒステリシスの1サイクル当たりの時間から散逸エネルギーを考察した。

その結果、衝撃実験では静的実験の散逸エネルギーに比べ 60[%]~80[%]のエネルギー散逸ができることが明らかとなった。また、動作圧力が 35[MPa]以上になると、エネルギー吸収率の低下が見られた。これは疎水化シリカゲルの細孔内に水が入りきり、ピストンの変位量が水の圧縮領域に入るため、ヒステリシスが小さくなり散逸エネルギーが減少するためであると考えられる。この現象は静的実験と同様の傾向が見られた。したがって、コロイダルダンパを効率の良い衝撃吸収機構として用いるためには、最大動作圧力を 30~35[MPa]以下とすることが望ましいことが明らかとなった。

次に、疎水化シリカゲルの質量と、落錘の質量と高さが同様の条件で、コロイダルダンパのピストン径を拡大した場合、ピストン径を拡大するとエネルギー吸収率が低下することがわかった。ピストン径を拡大するとピストンの変位が減少し、ヒステリシスの1サイクル当たりの時間が短くなる。衝撃エネルギーを吸収するためには、ピストンの断面積よりも時間の関数であるピストンの変位、すなわち、1サイクル当たりの時間が大きく影響し、ピストンの断面積が拡大するとエネルギー吸収率の低下が起こったと考えられる。したがって、疎水化シリカゲルの質量と与える衝撃エネルギーが同じで、ピストン径を変化させるという条件下では、ピストン径を小さくすることで、ピストンの変位を大きくし、1サイクル当たりの時間を長くするような設計にすると散逸エネルギーが十分に発揮されると考えられる。

(4) 定常振動に対するダンパの設計法

本研究の目的は、コロイダルダンパの性能実験より得られた減衰特性の結果をまとめ、減衰特性をモデル化することで、コロイダルダンパを用いた構造物の制振ダンパの設計手法を開発することである。

コロイダルダンパの1周期における散逸エネルギー、等価ばね定数を定式化し実験結果を同定する。次に、コロイダルダンパの減衰特性を構造減衰系と近似的にモデル化することで、コロイダルダンパを付加した1自由度ばね質量系における解を算出する。これらの

結果を求め、コロイダルダンパを用いた構造物の制振ダンパの設計手法を提案する。ケーススタディとして本研究で提案した設計手法を用い自動車用ショックアブソーバに、コロイダルダンパを用いた場合の設計パラメータの決定を行い、提案した設計手法の妥当性を評価した。

その結果、表1に示すモデルに対して図9のような目的関数の値が得られ、制約条件のもとで最適なコロイダルダンパの形状が表2のように決定されることがわかった。

表1 設計条件

構造物の質量 m	250kg
設計仕様の固有振動数 ω_n	1.5Hz
設計仕様の最大ストローク量 S_r	170mm
ピストン径の精度 ΔD_2	0.1mm
振動系の固有振動数の精度 $\Delta \omega$	0.01Hz
ピストン径の増減幅 ΔD	10mm
シリカゲルの増減幅 ΔM	5g
ばね定数の増減幅 ΔK	100N/m

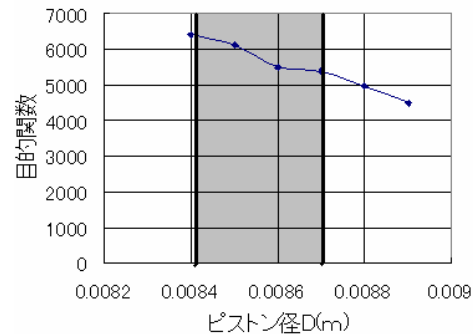


図9 目的関数とピストン径の関係

表2 設計パラメータの最適値

シリカゲルの粒子直径 r	20 μ m
シリカゲルの細孔直径 r_p	8nm
疎水処理材料	C8
ピストン径 D	8.71mm
シリカゲルの量 M	15.5g
シリンダー体積 V	46500mm ³
補助ばね定数 K	0(N/m)

(5) 衝撃に対するダンパーの設計法

本研究ではコロイダルダンパの衝撃吸収を最適に行うパラメータの設計手法の開発を行う。すなわち設計パラメータはストローク量(長さ)、シリンダー径、シリンダー内の多孔質材料の質量の3項目である。ストローク量に関しては運動方程式より、またシリンダー径と多孔質材料の量に関してはストローク量から求めたばね定数、減衰係数と実験データを用いて算出する。

図10はバンパーに相当するコロイダルダンパと自動車の質量 m を表している。自動車と衝突壁との距離を x [m]、速度 \dot{x} [m/s]、加

速度 \ddot{x} [m/s²], コロイダルダンパのばね定数を K_{CD} [N/m], 構造減衰係数 g とおき運動方程式をたてる. 自動車の時速 50[km/h]でコンクリートの壁に衝突したときに, 自動車の減速度 $60G[m/s^2]=588[m/s^2]$ 以下となる条件のもと, コロイダルダンパのばね定数 K_{CD} , 減衰係数 g と自動車の減速度(この場合は減速)の関係式を導く.

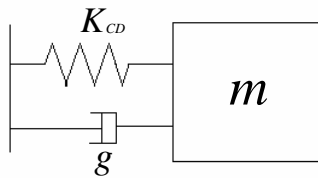


図 10 コロイダルダンパの構造

次に衝突時の加速度とコロイダルダンパのばね定数 K_{CD} と減衰係数 g との関係式が得られる. コロイダルダンパのストローク量算出方法は自動車が衝突してから停止するまでの距離で求められるから, 加速度と限界加速度とからストローク量が求められる. 次に, 減衰係数の算出を行う. これは衝突から停止するまでにかかるエネルギー量より求められる. この様にしてコロイダルダンパの形状とシリカゲルの量が決定でき, コロイダルダンパの設計ができる.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 岩壺卓三, 石川裕之, 田中剛, コロイダルダンパーの動特性に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 75 巻, pp.1508-1515, 2009 年, 査読有
- ② T. Iwatsubo, K. Washio, H. Yano, M. Miyazaki, Experimental Study of a Colloidal Damper to Practical Application, Journal of System Design and Dynamic, Vol. 2 No. 1, pp. 1160-1169, 2008 年, 査読有
- ③ T. Iwatsubo, C. V. Suci, M. Ikenaga, K. Yaguchi, Dynamic characteristics of a new damping element based on surface extension principle in nanopore, ELSEVIER, Journal of Sound and Vibration, 308, pp.579-590, 2007 年, 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① 岩壺卓三, 諸留稔也, コロイダルダンパ

による構造物の制振設計手法の開発, Dynamic and Design Conference 2011, 2011 年 9 月 5 日, 高知工科大学 (発表確定)

- ② 岩壺卓三, 山本啓介, 分子動力学を用いたコロイダルダンパのシミュレーション, Dynamic and Design Conference 2010, 2010 年 9 月 15 日, 同志社大学 京田辺キャンパス
- ③ 岩壺卓三, 小藪泰弘, コロイダルダンパの衝撃特性に関する研究, Dynamic and Design Conference 2009, 2009 年 8 月 7 日, 北海道大学 札幌キャンパス
- ④ 岩壺卓三, コロイダルダンパの動特性改善に関する研究, Dynamic and Design Conference 2008, 2008 年 9 月 2 日, 慶應義塾大学 日吉キャンパス
- ⑤ T. Iwatsubo, Simulation of water flow in a coated nano pore by a molecular dynamic, 3rd International Conference on Smart Materials, Structure & Systems, 2008 年 6 月 8 日, イタリアシチリア島ラペルライオーニカ国際会議場
- ⑥ 岩壺卓三, 守内智則, 斉藤健一, コロイダルダンパの基礎研究—粗水処理された細孔内流れの分子動力学シミュレーション, Dynamic and Design Conference 2007, 2007 年 9 月 25 日, 広島大学
- ⑦ T. Iwatsubo, K. Washio, H. Yano, M. Miyazaki, Development of a Colloidal Damper to Practical Application, Asia Pacific Vibration Conference, 2007 年 8 月 6 日, 北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩壺卓三 (IWATSUBO TAKUZO)

研究者番号: 00031097