

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究（C）（一般）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560246

研究課題名（和文） 磁気浮上型フィンの非線形共振を利用した振動式混合装置の開発

研究課題名（英文） DEVELOPMENT OF VIBRATORY MIXER USING NON-LINEAR RESONANCE OF  
MAGNETICALLY LEVITATED FIN

研究代表者

岡部 匡 (OKABE TADASHI)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：00185464

研究成果の概要（和文）：物質生産プロセスにおける液体-液体、液体-粉体の混合工程の高効率化をはかることを目的に、非線形共振を利用した振動式混合装置の開発を行った。本研究で開発した振動式混合装置は、円筒型槽拌槽内で、外部の周期変動磁場により磁気励振される磁気浮上攪拌フィンの往復運動を利用し、高効率に混合を行うものである。試作機の製作・実験、各種の数値解析を実施し、本研究で開発した振動型混合装置の有効性を確認することができた。

研究成果の概要（英文）：In order to improve the mixing efficiency for liquid-liquid or liquid-powder, vibratory mixer using levitated fin by magnetically repulsive force of a pair of permanent magnet is developed. The levitated fin is excited by the outside magnetic force fluctuating periodically and performs reciprocating motion in cylindrical mixing tank. The restoring force acted on the levitated fin has strong non-linearity. This mixing system effectively utilizes a non-linear resonance of the fin. Effectiveness of the developed vibratory mixer was confirmed through the experiments and the numerical simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：非線形振動、攪拌、磁気ばね、混合装置、振動利用、往復機械用振動低減装置

## 1. 研究開始当初の背景

食品、医薬品、化学工業をはじめ多くの工業分野で利用される各種材料や工業製品などの物質生産プロセスにおいて、液体と液体、または液体と粉体の攪拌・混合・溶解・分散工程（以下、この工程を一括して混合工程と呼ぶ）は、最も重要な基本単位操作である。近年、種々の物質生産において、従来よりも

増して物質の混合工程に対して、高速化・高精度化、分散粒子の高均一化が要求されている。とくにハイテク製品において使用される各種機能性材料ではナノレベルの均一な混合・分散が求められている。このような要求に応えるため、多くのタイプの攪拌・混合装置（以下、混合装置と呼ぶ）が利用されているものの、これら装置のほとんどが攪拌槽内

を回転翼で攪拌するタイプのものである。しかしながら、このタイプの混合装置は、装置規模が大きい、混合効率が非常に悪い、ダマ（粉体の未溶解固形物）の生成による不良品の発生、混合過程における不純物の混入など高い信頼性を実現する混合・融解・分散には多くの問題を抱えている。要求される品質スペックを満足しうる高い信頼性のある物質を生産するために、混合工程の1プロセスのみに多くの処理時間を費やして対応しているのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究では、混合工程の劇的な高効率化をはかるため、非線形共振を利用した振動式混合装置の開発を行うことを目的とする。本研究で開発する振動式混合装置は、攪拌槽内で磁気浮上する攪拌フィンの往復運動により、従来では混合・融解・分散が困難であった液体-液体、液体-粉体の混合工程を高効率に行うものである。とくに本研究では、往復運動する攪拌フィンの駆動メカニズムに磁気反発力を還元力項とする非線形振動系を採用し、その系において発生する非線形共振現象を攪拌フィンの運動に積極的に利用する。攪拌フィンを非線形共振させることにより容易に大振幅かつ高振動数のフィン往復運動を実現できる。本研究では、攪拌フィンの駆動機構として磁気反発力を利用するため、攪拌槽内で運動する攪拌フィンを駆動するための機械部材が必要なく、攪拌槽内を周囲環境から完全に遮断できる。このため、従来の混合装置で深刻な問題となっていた混合液への外部からの不純物の混入という問題も解決できる。攪拌槽内の液中で振動する攪拌フィンの振動特性、振動攪拌フィンまわりの流体の挙動の解明などについて、数値解析と実験の両面から検討を行い、実用化をも視野に入れた振動型混合装置を開発する。

## 3. 研究の方法

### (1) 振動型混合装置の試作

#### ① 全体構造

図1に本研究で製作した振動型混合装置の概略図を、図2に攪拌フィンの形状を示す。以下に本装置の特徴を説明する。

本振動型混合装置は、磁気反発力によって攪拌槽内で浮上した攪拌フィンを、周期変動する磁場によって外部より強制的に励振させて攪拌を行う装置である。これによって攪拌槽と外部環境の分離が可能となり、従来の振動型混合装置で問題点となっていた、混合液への不純物の混入などの問題を解決できる。攪拌フィンの両端に二つの永久磁石 A', B' を取付け、それぞれに同極が対向するように攪拌槽の下部と上部に永久磁石 A, B を設

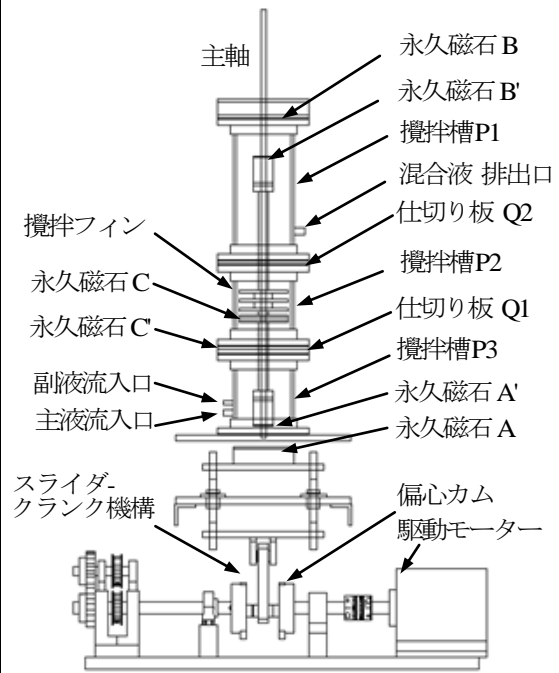


図1 振動型混合装置の概観図

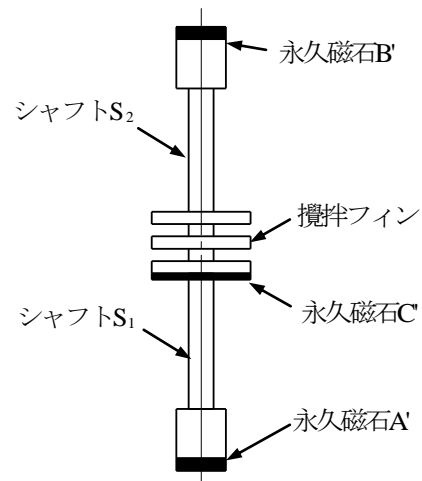


図2 攪拌フィン

置している。また、攪拌フィン中央部にも永久磁石 C', 攪拌槽中央部に永久磁石 C を同極が対向するように取付ける。本装置では、主に永久磁石 C-C'間の磁気反発力により攪拌フィンを浮上させている。これらの永久磁石には、ネオジウム磁石を使用した。攪拌槽下部に設置した主液注入口から混合液の媒体となる主液を、副液注入口から副液を注入し、振動する攪拌フィンにより混合された後、攪拌槽上部の排出口から主液と副液の混合液を排出する。攪拌槽は、内径 90mm の3個の亚克力パイプ P1~P3 で構成され、それぞれの亚克力パイプの間には、液が通過できるように4か所に穴をあけた仕切り板 Q1, Q2

が設置されている。攪拌フィンが運動する P2 部の攪拌ユニットが実際に混合を行う部位である。この攪拌フィンは中央の羽部と両端に取付けた永久磁石 A'、B' 及び中央に取付けた永久磁石 C' とそれらをつなぐ 2 本のシャフト  $S_1, S_2$  によって構成されている(図 2 参照)。攪拌フィンは積層円盤形の 3 層の羽根部を有し、それぞれの円板の 4 か所に穴をあけた半径 40mm のアクリルプレートで構成されている。

②攪拌フィンの励振機構

攪拌槽外の下部に設置された下部永久磁石 A の周期的運動によって、攪拌フィンに作用する磁気力が変化して攪拌フィンを励振する。永久磁石 A の駆動にはスライダ・クランク機構を使用し、モーターの回転を往復運動に変換している。

(2)攪拌フィンの振動特性の解明

磁気ばねの復元項とする攪拌フィンの運動は、強い非線形振動系を構成する。このため、非線形振動系における数値解法であるシューティング法及び平均法による数値解析を実施して、攪拌フィンの振動特性を検討した。なお、攪拌フィンの周辺流体の抵抗による減衰能の測定は、高減衰の同定にも適用可能である位相法を利用した。

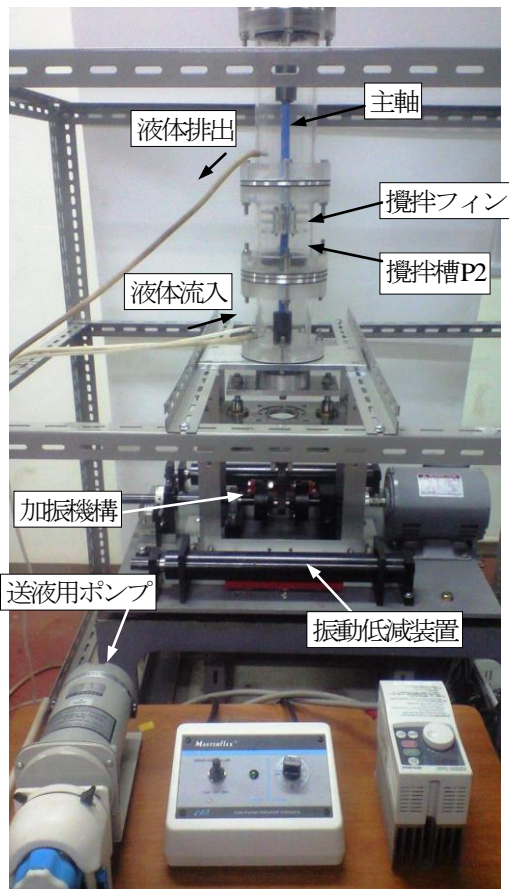


図 3 振動型混合装置全体図

(4)フレームに発生する振動の低減

攪拌フィン励振用の磁石 A の往復運動実現のため、スライダ・クランク機構を採用した。この機構では、往復運動部(磁石 A)、コンロッド、クランクの不つり合い慣性力が発生するため、混合装置全体に有害な振動が発生する。この振動が混合装置の高速運転の障害となる。このため、本研究では、スライダ・クランク機構により発生する不つり合い慣性力を除去する新たな振動低減装置を開発した。

(5)液中攪拌フィンの振動特性の解明

磁気反発による非線形復元力特性、及び液中攪拌フィンの減衰能の同定を実施し、数値解析を実施し、攪拌フィンの振動特性を明らかにした。

(6)攪拌フィン周辺流体の運動解析

液中で高速で振動する物体の周辺の流体の運動を明らかにするため、本研究では粒子法の一つである SPH 法をベースとしたプログラムを開発し、攪拌槽内の流体運動の数値シミュレーションを実施した。

4. 研究成果

(1)試作機の製作

図 3 は、試作した振動型混合装置の全体図である。この装置が所要の機能を発揮するよう行った研究の成果を以下に述べる。

(2)攪拌フィンの振動特性の解明

①運動方程式

攪拌フィンの解析モデルを図 4 に示す。永久磁石 A'、B'、C' が取り付けられている磁気浮上型攪拌フィンの質量を  $m$  とする。フィンは永久磁石 C-C' の磁気反発力で浮上し、基礎部(静止部)からの変位を  $x$  とする。各磁石の距離を図 4 のように定義する。攪拌フィン下部に設置された磁石 A は、 $S(\omega t)$  なる往復運動する磁石 A により励振される。このとき、

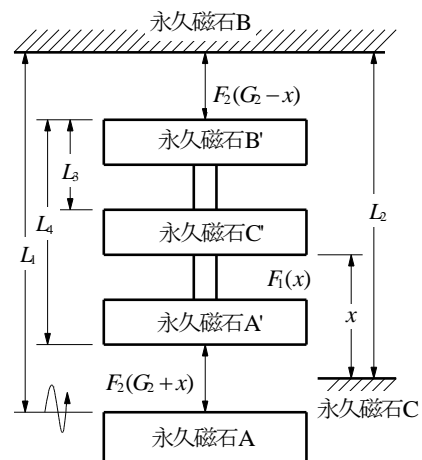


図 4 攪拌フィン解析モデル

攪拌フィンの運動方程式は次式となる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + mg - F_1(x) - F_2(G_1 + x) + F_2(G_2 - x) = 0 \quad (1)$$

ここに、 $c$  [Ns/m]は減衰係数、 $F_1(x), F_2(x)$  [N]は、それぞれ永久磁石 A-A'と C-C'間の磁気反発力を表す磁気ばね関数である。式(1)中の $G_1, G_2$ は次式で表される。

$$G_1 = L_1 - S(\omega) - L_4 - L_2 + L_3 \quad (2)$$

$$G_2 = L_2 - L_3 \quad (3)$$

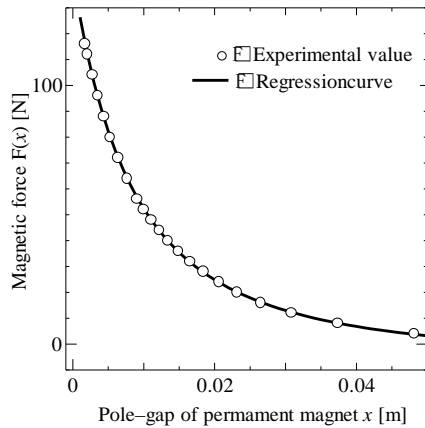
本装置では、スライダ・クランク機構を用いて、駆動モーターの回転運動をフィン励振用永久磁石 A の往復運動に変換している。式(2)中の $S(\omega)$ は、永久磁石 A の変位を表しており、 $\omega$  [rad/s]は駆動モーターの回転数である。

### ②磁気ばねの同定

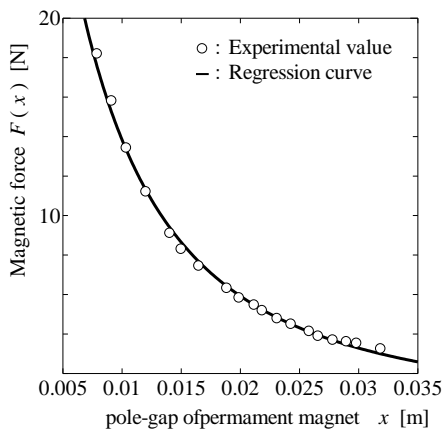
式(1)中の、磁気ばね関数 $F_1(x), F_2(x)$ は、次の近似式を用いた。

$$F_i(x) = A_i \left( \frac{D_i}{B_i + x} \right)^2 + C_i, \quad (i=1,2) \quad (4)$$

上式中のパラメータ $A_i, B_i, D_i, C_i, (i=1,2)$ は



$F_1$

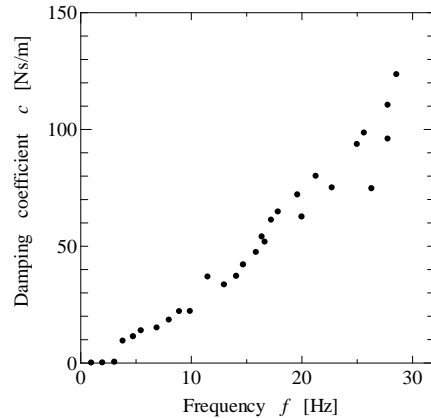


$F_2$

磁気反発力の実測値から最小自乗法により決定した。図5には、永久磁石 A-A'、及び C-C'の磁気反発力の計測値及び式(4)による近似結果を示す。実線が式(4)による近似式、○が実験結果である。

### ③減衰能の推定

液体中で振動する攪拌フィンの減衰能の同定は、位相法を用いて決定した。通常、減衰能の推定に用いられる Q ファクター法などは、減衰能が小さい系のみ有効であるが、液体中で振動する攪拌フィンの運動のように極めて減衰能が大きい場合には適用できない。そこで本研究では、攪拌フィンの減衰能の同定には位相法を用いた。図6に、位相法により決定した水中で振動する攪拌フィンの減衰係数の同定結果を示す。図6から振動数に依存して減衰係数が大きく変化することがわかる。図示の振動数域では、 $\omega$ が増加するにつれて減衰係数が増加している。今後、攪拌フィンの運動の数値解析の精度を向上させるために、この結果を数値シミュレーションに反映させていく計画である。



### ④水中攪拌フィンの振動特性

本研究で製作した振動型混合装置の攪拌フィンの振動特性の確認を行った。攪拌槽内には水を注入しながら、磁石 A の運動により発生する周期変動磁気力を磁石 A' に作用させ、攪拌フィンを励振した。加振部 (磁石 A) の加振振幅を 10mm とした場合の攪拌フィンの Peak-to-peak 振幅 (以後、p-p 振幅と呼ぶ) の周波数応答を図7に示す。加振周波数を 1.0Hz から 1.0Hz 刻みで増加させ、共振点付近と思われる振動数範囲では 0.5Hz きざみで測定を行った。横軸は加振周波数  $\omega$  Hz (モーター回転数) であり、縦軸は p-p 振幅  $X_p$  である。図7から、加振振幅 (磁石 A の往復運動振幅) が  $a = 10$ mm の場合、振動数が約 4.5Hz で攪拌フィンの共振が発生していることが確認できる。加振振幅を増加させると、攪拌フィンの p-p 振幅はさらに大きくなり、大振幅での攪拌・混合操作が

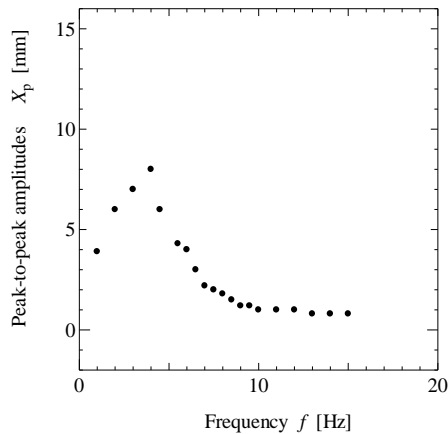


図7 攪拌フィンのp-p振幅の周波数応答

可能であることが確認できた。

今回の実験は、永久磁石B-B'の磁石間距離を非常に大きく設定して実施したものであり、そのため共振は低い振動数で発生している。磁石B-B'と磁石C-C'の磁石間距離をさらに小さくし攪拌フィンに作用する磁気ばねを硬くすれば、共振振動数をより高振動数域に移動させることが可能である。その結果、攪拌フィンを高振動数域で共振を発生させ大振幅で振動させることが可能となる。

### (2)試験機に発生する有害振動の低減

本研究で開発した混合装置において、磁石Aの往復運動を実現するために、スライダクランク機構を利用している。スライダクランク機構においては、クランクの回転振動数と同期した不釣り合い慣性力とその整数倍の振動数成分をもつ高調波不釣り合い慣性力が発生する。これに起因して、振動型混合装置全体に有害な振動発生し、混合装置の高振動域でも運転の障害となっていた。この問題に対処するため、本研究では、スライダクランク機構の1次、2次の不釣り合い慣性力を完全に除去する振動低減装置を開発した。図8に、本研究で開発したスライダクラ

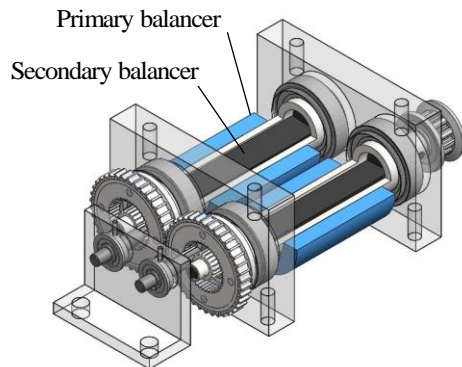


図8 スライダクランク機構用振動低減装置

ンク機構用振動低減装置を示す。振動低減装置内に設置した1次、2次バルancerシャフトにより1次、2次の水平及び鉛直方向の不釣り合い慣性力を完全に除去することが可能である。本装置を混合装置下部に設置することにより、大幅に混合装置全体の有害振動の低減が可能となった。

### (3)攪拌フィン周辺流体の運動解析

高速で振動する攪拌フィンの周辺流体、及び攪拌槽内における流体の挙動を明らかにするため、本研究では、SPH法の計算理論をベースとした数値解析プログラムを作成した。本研究では、攪拌槽を模した基本的な計算モデルでの3次元数値シミュレーションを実施し、開発したプログラムの有効性を検証した。図9に計算モデルを示す。 $H_1, R_1$ は攪拌槽の高さと直径であり、 $H_2, R_2$ は円板型攪

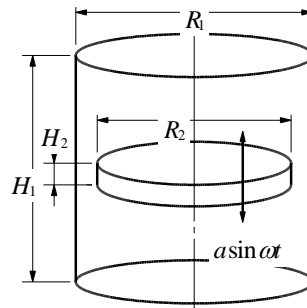


図9 攪拌槽内で振動する攪拌フィンのSPH法の解析モデル

表1 SPH法の計算パラメータ

$H_1$	0.13 [m]
$H_2$	$0.50 \times 10^{-2}$ [m]
$R_1$	$0.90 \times 10^{-1}$ [m]
$R_2$	$0.60 \times 10^{-1}$ [m]
$a$	$0.30 \times 10^{-2}$ [m]
$\omega$	$10\pi$ [rad/s]
$h$	$0.60 \times 10^{-2}$ [m]

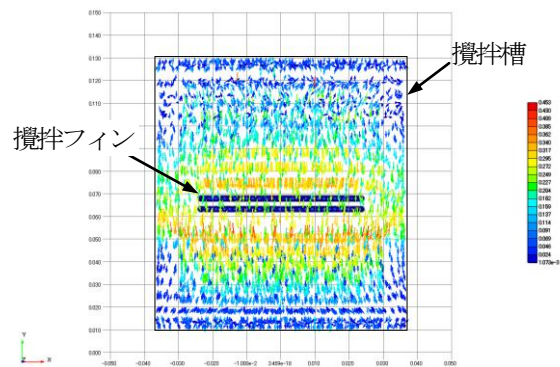


図10 SPH法による攪拌槽内の振動円板まわりの流体運動の解析結果



拌フィンの厚さと直径であり、攪拌フィンは  $asin\omega t$  なる振動を行っている。計算に用いたパラメータを表1に示す。ただし、表1中の  $h$  は SPH 法におけるカーネルの半径である。攪拌槽は、水で満たされているものとし、計算におけるタイムステップは  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$  s とした。図10にSPH法による攪拌槽内の振動攪拌フィンまわりの流体の速度ベクトル図を示した。図10は、2000タイムステップ(2s)後のときの速度ベクトル線図である。攪拌フィン直下の流体(粒子)は、下向きの速度を持ち中央部の円板によって下部の粒子密度が大きくなっている。

今後は実際の現象との比較を実施し、本プログラムの解析精度を検証する必要がある。本プログラムを用いた数値解析により攪拌槽内の流体の挙動を把握でき、攪拌フィンの最適形状を決定することも可能となる。

#### (4)総括

高効率振動型混合装置の開発のため、種々の分野にわたる研究開発を実施してきた。各課題に対しては、個々については十分な成果を得られたものの、さらに検討・改良を行わなければならない課題も存在することが明らかとなった。しかしながら、本研究を通して、開発を行ってきた振動型混合装置の有効性を確認でき、その実現可能性についても十分な見通しを得ることができた。本研究で得られた知見・成果を基礎として、今後も本研究を継続して行く計画である。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

①西林航, 岡部匡, 磁気浮上型フィンを利用した振動型混合装置(フィン加振機構の改良と水中攪拌フィンの減衰係数の同定), 宮崎大学工学部紀要, 査読無, 第40号, 2011, pp. 187-192

②山田典雅, 岡部匡, 磁気浮上攪拌フィンを利用した振動型混合装置の開発, 宮崎大学工学部紀要, 査読無, 第39号, 2010, pp. 217-24

③T. Okabe, T. Kondou, J. Ohnishi, Elliptic Averaging Methods Using the Sum of Jacobian Elliptic Delta and Zeta Functions as the Generating Solution, Int. J. Non-Linear Mechanics., 査読有, Vol.40, pp.159-169, 2011

[学会発表] (計14件)

①竹下浩史, 磁気浮上型攪拌フィンを利用した振動型ミキサの開発, 日本機械学会九州支部宮崎地区学生研究発表会, 2012年3月19日, 宮崎大学

②T. Okabe, Vibration Reduction Device for a Reciprocating Machine with a Single Slider-Crank Mechanism, 7th International Conference on Vibration Engineering and

Technology of Machinery, 2011年11月22日, Sheraton Walker Hill Hotel Shanghai, China

③T. Okabe, On the Elliptic Averaging Method for Nonlinear Oscillators Having Multi-Degree-of-Freedom, The 2011 World Congress on Advanced in Structural Engineering and Mechanics, 2011年9月11日, Shanghai Jiao Tong University, Seoul, Korea.

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: 往復機械用振動低減装置及び往復機械

発明者: 岡部 匡

権利者: 宮崎大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-134452

出願年月日: 2011年6月16日

国内外の別: 国内

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

岡部 匡 (OKABE TADASHI)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号: 00185464

##### (2)研究分担者

菊地 正憲 (MASANORI KIKUCHI)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号: 80091677

長田 尚一郎 (NAGATA SHOICHIRO)

宮崎大学・工学部・助教

研究者番号: 20218001

##### (3)連携研究者

近藤 孝広 (KONFDOU TAKAHIRO)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号: 80136522