

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 8 月 26 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560266

研究課題名(和文) 磁気励振攪拌フィンを利用した高速・高性能振動型ミキサーの開発

研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF VIBRATORY MIXER WITH HIGH SPEED AND HIGH PERFORMANCE USING
MAGNETICALLY EXCITED STIRRING 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：各種物質生産における攪拌・混合工程の効率化をはかるため、磁気反発力により浮上した攪拌フィンの非線形共振を利用した振動型ミキサーの開発を行った。磁気浮上攪拌フィンは円筒状攪拌槽内において振動し、効率的に攪拌・混合操作を行う。攪拌フィンの励振方法として、攪拌フィン内に固定された永久磁石に対し、攪拌槽外部から作用する周期変動する磁気力を利用するため、攪拌槽内を周囲環境から完全に遮断できる。このため、従来の振動型混合装置で問題となっていた混合液への外部からの不純物の混入を防止できる。試作機を設計・製作し、実験と数値解析を通して、本研究で開発した振動型ミキサーの有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to improve efficiency of mixing process for various materials, vibratory mixer using stirring fin levitated by magnetically repulsive force is developed. Vibration system governed of motion of the stirring fin has strong non-linearity. By utilizing non-linear resonance of the stirring fin, intense vibration of stirring fin can be realized. The stirring fin vibrates intensely in cylindrical mixing tank and perform stirring operation with high speed and high performance. The developed mixer utilize periodically changed magnetic force from the outside of the mixing tank in order to excite the stirring fin. Since liquid in the mixing tank is completely interrupted from an external environment, the developed mixer has advantage that no impurity in mixing process is mixed. Effectiveness of the developed mixer was confirmed through experiments and numerical calculations.

研究分野：機械工学，機械力学，振動工学

キーワード：非線形振動 非線形共振 振動利用 攪拌 磁気ばね 混合装置

1. 研究開始当初の背景

攪拌・混合操作は、化学工業、食品工業、製薬工業などの様々な工業製品の生産プロセスにおいて、必要不可欠な基本操作の一つである。近年、種々の工業製品や物質生産における物質の攪拌・混合処理に対して、高速化および品質の均一化などの要求が高まっている。現在使用されている混合装置は、攪拌槽内で回転する攪拌翼を用いて混合・攪拌操作を行うものが主流である。均一系の液体混合においては、如何に対象となる液体塊を変形させて細分化できるかが重要となる。この回転翼を利用した混合装置では、混合効率を改善するために、多種多様な攪拌翼が利用されている。しかしながら、このような攪拌翼の回転運動により、液体塊の変形・細分化を促進する方法は、混合効率の点から最良の方法とは言いがたい。さらに、回転翼型の混合装置では、混合する液体の処理量が多い場合には、装置規模が大きくなり設備コストが高くなる。このような背景から、各種生産現場において、より効率的な攪拌・混合装置の開発が望まれている。

2. 研究の目的

均一な混合が得られるという振動型混合、及び連続操作という長所を持ち合わせた混合装置として振動型ミキサーが開発されている。この振動型ミキサーは、従来の回転翼型の混合装置に代わる新たな高効率混合装置として期待されている。しかしながら、攪拌フィン駆動用軸のシール部の動力損失や、混合液への不純物混入の問題など、改善すべき問題点をもつ。本研究では、この振動型ミキサーの高性能化を目的とし、攪拌槽内で磁気浮上する攪拌フィンを利用した振動型ミキサーの開発を行った。本研究で開発した混合装置は、従来の振動型ミキサーでは不可能であった攪拌槽内と外部環境との完全な分離が実現できるという長所を有し、従来の振動型ミキサーで最大の問題点となっていた攪拌槽内の液体への不純物の混入を防止できる。また、磁気浮上攪拌翼の運動に非線形共振を利用することも特徴の一つである。

3. 研究の方法

(1) 振動型ミキサーの概要

①振動型ミキサーの構造：本研究で製作した振動型混合装置の全体図を図1に示す。本振動型ミキサーは、主に混合部と加振部から構成される。混合部は実際に混合操作を行う部位であり、円筒型攪拌槽内で磁気浮上する攪拌フィンが組み込まれている。この攪拌フィンは上下方向の運動のみが可能のように拘束されている。この磁気浮上攪拌フィンの往復運動により後逸的な液液混合あるいは固液混合を行う。攪拌部の下側部には、攪拌部と独立に設置された加振部があり、攪拌槽内の攪拌翼に対し、攪拌槽外部にある永久磁石の周期的運動により磁気励振する。

②混合部：混合部を図2に示す。混合部はベースプレート P_1 、 P_2 により外部フレームに固定されている。混合される液体は、円筒型攪拌槽の下部から流入し、上部から排出される。この混合部は、2個の磁気浮上ユニット L_1 、 L_2 と3個の混合ユニット M_1, M_2, M_3 、励振ユニット、排出ユニット、ベースプレート、中心軸、攪拌フィンから構成される。攪拌フィンを図3に示す。攪拌翼は中空円筒の外周部に9枚の攪拌プレート、励振用磁石 a, b と磁気浮上用磁石 c が取り付けられており、これらは一体となって運動する。液体は、流入口から流出口へ流れる間に、3個の混合ユニット部 M_1, M_2, M_3 を通過し、そのユニット内にある9枚の攪拌プレートの往復運動により混合される。図4に混合ユニットの構造を示す。一つの混合ユニット内では、3枚の攪拌プレートが運動する。本研究で製作した混合装置は、この攪拌ユニットが直線状に3個連結された構造である。磁気浮上ユニット L_1 、 L_2 は、攪拌フィンに取り付けた永久磁石 a, b に対して、永久磁石 A, A', B, B' により磁気反発力を作用させ、攪拌フィンを浮上させる部位

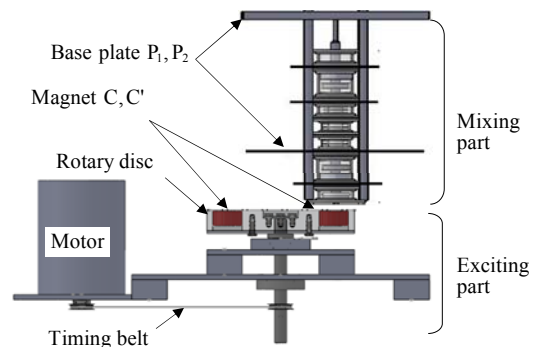


図1 振動型混合装置の全体図

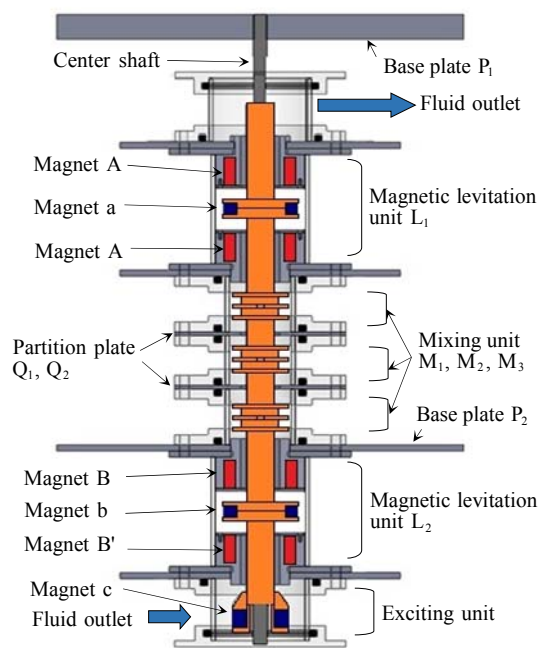


図2 混合部の構造

である。このように、二つの磁石で攪拌フィンに固定された磁石 a, b を挟み込む構造としたことで、攪拌フィンに作用する磁気ばね特性を漸硬型非線形ばねとすることができる。この磁気浮上ユニット内の各磁石の磁石間距離は調節可能であり、この調整により、攪拌フィンの振動系の固有振動数、すなわち共振振動数の調整ができる構造になっている。

③加振部：攪拌翼下部にある磁石 c に周期的に変動する磁気力を作用させ、磁気浮上攪拌翼を励振する。2個のネオジム磁石 C, C' を内包した円板を、水平面内で回転させることにより、攪拌翼下部の磁石 c に周期的に変動する磁気反発力を作用させる構造である (図 5 参照)。この機構では、攪拌フィン下部の磁石 c と回転円板内の磁石 C, C' とを十分近接させることができ、強い磁気励振力を発生させることができる。

4. 研究成果

(1) 攪拌フィンの振動解析モデルの構築：攪拌フィンの振動特性を明らかにするために、攪拌フィン振動系の数学モデルを構築した。攪拌フィンには、複雑な磁気力が作用するため、この磁気力の解析モデルを作成する必要がある。攪拌フィンを浮上させるために利用している a-A, a-A', b-B, b-B' 間の磁気反発力を、田村ら^①が提案した次の近似式を用いて作成した。

$$F(x) = e(x+b)^{-p} + c \quad (1)$$

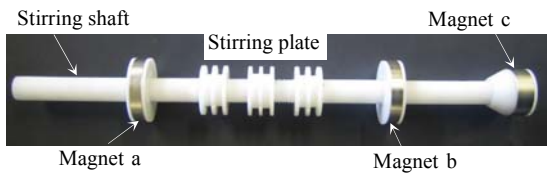


図 3 一体型攪拌シャフト (攪拌フィン)

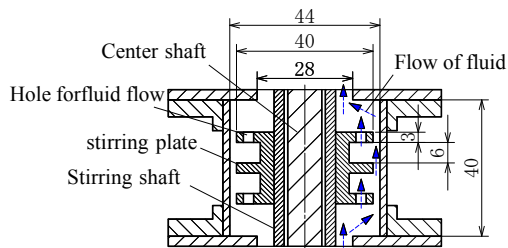


図 4 混合ユニットの構造

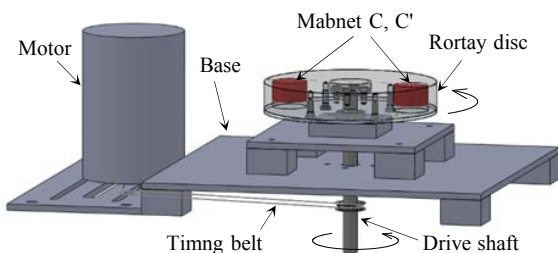


図 5 攪拌部の構造

ここで、 $P=2$ とし、式(1)中の b, c, e は磁気反発力の実験結果から決定される定数である。攪拌フィンには、磁石対 a-A, a-A', b-B, b-B' の磁気力がすべて作用する。図 6 に、攪拌フィンに作用するすべての磁気力を加えた攪拌フィンの復元力特定を示した。図 6 中の ξ は平衡点 (攪拌フィンが静止時に浮上し静止している点) からの攪拌フィン鉛直方向の無次元化変位で、 $K(\xi)$ は磁気攪拌フィンに作用する無次元化磁気力である。これら $\xi, K(\xi)$ の無次元の定義は紙幅の制約から省略した。図 6 からわかるように、攪拌フィン振動系は漸硬型の非線形特性を持っていることが確認できる。

本研究では、上記の磁気ばねの近似式を利用して攪拌フィンの運動方程式 (解析モデル) を構築した。なお、運動方程式中の減衰項については、位相法を用いて同定を行った。

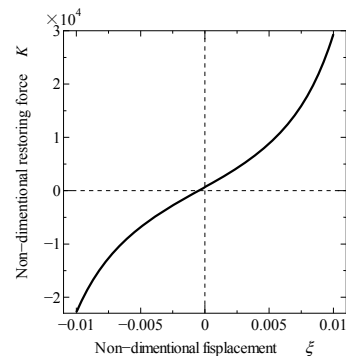


図 6 攪拌シャフトに作用する磁気ばねの復元力特性

(2) 攪拌フィンの振動特性の解明：攪拌フィンの振動特性を明らかにするために、攪拌フィンの加振実験を実施した。実験は加振部の AC モータの運転周波数を変化させて、攪拌槽内の攪拌フィンの両振幅を測定した。実験は、磁石対 a-A, a-A', b-B, b-B' 間の距離 D_1, D_2, D_3, D_4 を変更して実施した。磁石間距離を $D_1 = D_3 = 15\text{mm}, D_2 = D_4 = 14\text{mm}$ とした場合の攪拌フィンの p-p 振幅の周波数応答結果を図 7 に示す。この実験では、攪拌槽には液体 (水) 流入させて実施した。図 7 からわかるように、24Hz で共振が発生し、そのときの振幅は 6.75mm であった。そのときの振動波形を図 8(a) に示す。従来の機械駆動式の振動型ミキサー^②においては、攪拌フィンの運転周波数が 15Hz 以上、攪拌フィンの両振幅値 6mm 以上の場合には十分な攪拌・混合が可能であるとの実績がある。このことから、本研究で試作した混合装置では、水に対しては従来の機械駆動式の振動型ミキサーの運転条件を満足する攪拌フィンの運動を達成できた。一方、加振周波数 24Hz から 27Hz の間で発生する共振以外に、加振周波数 7Hz から 12Hz で攪拌フィンの両振幅の上昇が確認できる。図 8(b) には、振動数 9Hz における攪拌フィンの振動波形を示した。この振動数域の振動は、攪拌部から攪拌フィンへの加振

力がパルス状の加振を行っているために発生したものであり、その応答もインパルス応答の挙動を示している。加振振動数が非常に低いため、パルス状の入力に対し大変位の応答が発生した後、減衰自由振動の応答が発生していることが確認できる。この振動域の攪拌フィンの振動は、振幅は大きいものの、振動数が非常に低いため攪拌操作に利用するには不適である。

(3) 交流磁場の利用による電磁力加振式混合装置の開発

本研究では、前述した外部永久磁石の回転運動を利用した加振方式以外に、攪拌槽外部に設置したコイルにより発生する交流磁場を用いた電磁力加振方式についても検討を行った。試作機を作成し、液中の攪拌フィンの振動実験を実施した。(使用した混合装置や攪拌フィンは前述の混合装置と異なるものである)。図9には、この方式で加振した場合の攪拌フィンの振幅に周波数応答の一例を示す。縦軸は、攪拌フィンのp-p振幅、横軸はコイルに流す交流の周波数である。外部コイルに4A(実効値)の交流を流した場合、攪拌フィンは13Hzで共振し、そのときの振幅は6.4mmを実現することができた。この基礎実験を通して、この加振方式は、本ミキサーへ十分利用可能であるとの見通しを得ることができた。

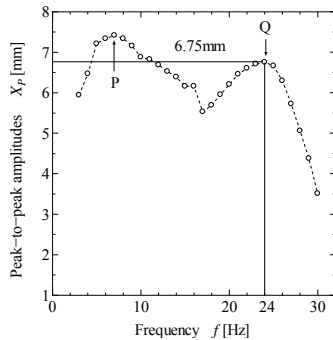
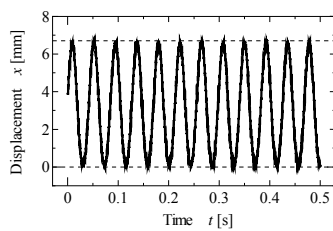
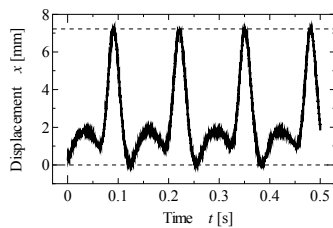


図7 攪拌シャフトのp-p振幅の周波数応答(外部永久磁石による加振方式)



(a) $\omega = 24 \text{ Hz}$



(b) $\omega = 8 \text{ Hz}$

図8 攪拌シャフトの振動波形

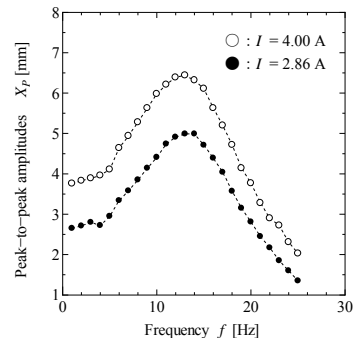


図9 攪拌シャフトのp-p振幅の周波数応答(電磁力による加振方式)

(4) SPH法による攪拌槽内の液体運動の解析プログラムの開発

攪拌槽内では、攪拌フィンの往復運動により、異種の液体が混合するとともに、複雑な運動が発生する。この複雑な混合現象を把握するためには、有限要素法などの格子法による解析は不可能である。そこで、本研究では、粒子法の一つであるSPH法の計算理論を基盤とした攪拌槽内液体の運動解析プログラムを作成した。計算モデルを図10に、計算結果の一例を図11に示した。計算で用いた代表的パラメータは図中に示した。図11は、3枚の円板の往復運動により、攪拌槽内の異

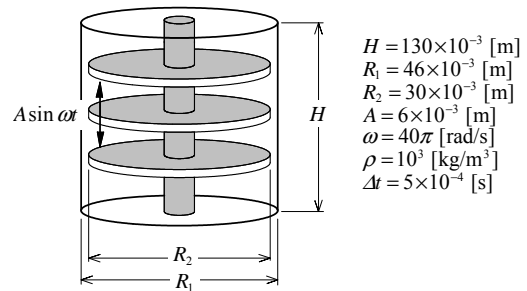


図10 攪拌槽内の液体運動の解析モデル

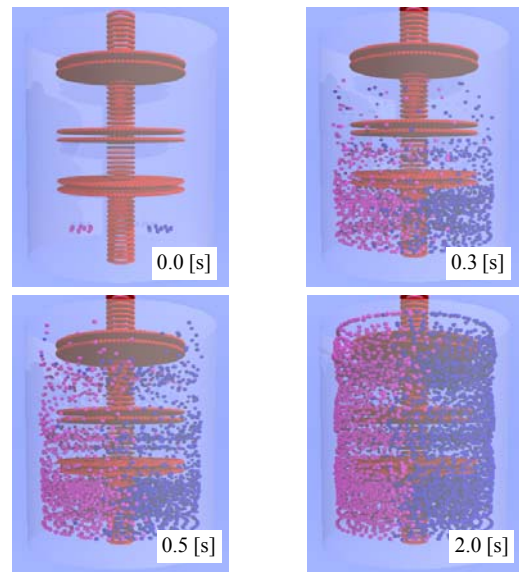


図11 SPH法による攪拌槽内の液体運動の計算結果(2種類の液体の混合)

なる2種類の液体が混合される様子を計算したものである。この計算モデルでは、液体は、攪拌槽の底から順次流入($t=0s$)し、最終的に上部の液体出口から流出する。図11は、流入後 $t=0.3, 0.5, 2.0s$ の攪拌槽内液体の挙動を示したものである。今後、このプログラムの利用により、攪拌槽内の液体運動の解析が可能となり、混合に適した攪拌フィンの形状や仕様について検討することが可能である。

(5)その他の研究成果

本研究では、上記以外に、混合装置のフレーム部の有害振動を防止する振動低減装置、及び固液混合(粉体と液体)用に供するための高精度連続定量型粉体供給装置の開発を行い、十分な成果を得ることができた。

(6)総括

本研究では、攪拌槽内で磁気反発力により浮上する攪拌フィンの往復運動を利用した混合装置を開発した。磁気浮上攪拌フィンの励振機構として、攪拌槽外部におかれた永久磁石の周期運動を利用する方式、攪拌槽外部に設置したコイルによる交流磁場を利用する方式を開発した。開発した振動型ミキサーにおいて、その攪拌フィンの振動周波数や振幅は、効率的な混合を実現できる性能を満足するものである。本研究において得られた多くの知見と技術は、本方式の混合装置の実用化へつながる基礎を確立するものである。

<引用文献>

- ①田村, 徐, 松永, 磁気ばね関数の同定プログラム, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 58 巻 546 号, 635-642, 1992
- ②大村, 他 5 名, 振動式混合装置” VIBRO MIXER” の混合特性, 化学工学論文集, 第 30 巻第 1 号, 1-5, 2004

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ①竹下 浩史, 岡部 匡, 他 3 名, 磁気浮上型攪拌翼を利用した振動型ミキサーの開発 (混合ユニットの増設と加振機構の改良) 宮崎大学工学部紀要, 査読無, 第 43 号, 2014, 153-158
- ②岡部 匡, 濱畑 貴之, 西畠 裕人, ホッパー下部に設置した円錐体の偏心公転運動を利用した粉体フィーダの開発, 粉体工学会誌, 査読有, 第 51 巻, 第 5 号, 2014, 330-226
- ③T. Okabe, T. Iwabata, and T. Hamahata, Vibration Reduction Device for a Reciprocating Machine with a Single Slider-Crank Mechanism, *Advances in Vibration Engineering*, 査読有, 12(5), 2013, 475-487

[学会発表] (計 11 件)

- ①西畠 裕人, 岡部 匡, 濱畑 貴之, ホ

ッパーと円錐体の相対運動を利用した粉体フィーダの開発, 粉体工学会 2014 年度秋季研究発表会, 2014 年 11 月 25 日, 東京ビッグサイト

- ②岡部 匡, 竹下 浩史, 他 3 名, 磁気反発力により浮上する攪拌フィンを用いた振動型ミキサーの開発, 日本機械学会九州支部鹿児島講演会, 2013 年 9 月 28 日, 鹿児島大学

- ③T. Okabe, T. Hamatata, D. Goto, Reduction of Primary and Secondary Vibrations of Reciprocating Machine with a Single Slider-Crank Mechanism by Small and Lightweight Balancer, 15th Asia Pacific Vibration Conference, 2013 年 6 月 2-6 日, 218-222.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

- ①名称: 磁気浮上式発振装置, 磁気浮上式攪拌混合装置, 及び磁気浮上式攪拌混合システム

発明者: 岡部 匡

権利者: 宮崎大学, 冷化工業株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2015-162409

出願年月日: 2015 年 8 月 20 日

国内外の別: 国内

- ②名称: 粉体供給装置

発明者: 岡部 匡

権利者: 宮崎大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-236980

出願年月日: 2014 年 11 月 21 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・工学教育研究部・教授

研究者番号: 00185464

(2) 研究分担者

小園 茂平 (OZONO, Shigehira)

宮崎大学・工学教育研究部・教授

研究者番号: 10169302

長田 尚一郎 (NAGATA, Shoichiro)

宮崎大学・工学教育研究部・助教

研究者番号: 20218001

(3) 連携研究者

近藤 孝広 (KONDOU, Takahiro)

九州大学工学研究院・教授

研究者番号: 80136522