



磁気浮上攪拌翼を用いた振動型混合装置の開発(コイルによる交流磁場を用いた加振方式の場合)

|       |                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | <p>言語: jpn</p> <p>出版者: 宮崎大学工学部</p> <p>公開日: 2020-06-21</p> <p>キーワード (Ja):</p> <p>キーワード (En):</p> <p>作成者: 近藤, 優也, 岡部, 匡, 濱畑, 貴之, 臼山, 智洋,<br/>Kondoh, Yuya, Okabe, Tadashi, Hamahata, Takayuki,<br/>Usuyama, Tomohiro</p> <p>メールアドレス:</p> <p>所属:</p> |
| URL   | <p><a href="http://hdl.handle.net/10458/5870">http://hdl.handle.net/10458/5870</a></p>                                                                                                                                                            |

## 磁気浮上攪拌翼を用いた振動型混合装置の開発 (コイルによる交流磁場を用いた加振方式の場合)

近藤 優也<sup>a)</sup>・岡部 匡<sup>b)</sup>・濱畑 貴之<sup>c)</sup>・臼山 智洋<sup>a)</sup>

### Development of Vibratory Mixer by Using Magnetically Levitated Fin (Vibration Method Using an Alternating Magnetic Field by the Coil)

Yuya KONDOH, Tadashi OKABE, Takayuki HAMAHATA, Tomohiro USUYAMA

#### Abstract

In order to improve the efficiency of mixing process, the vibratory mixer by using magnetically levitated fin is developed. The stirring fin of this mixer is levitated with the magnetic force in stirring tank, and excited from outside stirring tank by periodically changing electromagnetic field. The electromagnetic field is generated by a coil installed outside the stirring tank. By adopting this exciting system, mixed liquid in the stirring tank can be isolated from external environment, and then contamination into a mixed liquid can be prevented completely. In order to investigate vibration characteristics of the stirring fin, a prototype of this mixer is manufactured and experiments are performed. Experiments are executed on condition that stirring tank is filled with water. Frequency response of peak-to-peak (pp) amplitude and waveform of stirring fin are shown. The developed vibratory mixer of electromagnetic type can achieve competent performance for mixing, i.e., the resonance frequency is 14.4Hz and pp amplitude of the stirring fin is 8.7mm. From the results of the experiments, effectiveness of the developed vibratory is confirmed.

**Keywords:** Nonlinear vibration, Vibratory mixer, Magnetically levitated Fin, Electromagnetic force

#### 1. はじめに

化学工業のほとんどあらゆる分野にわたり、最も重要な基本単位操作の一つとして、液体と液体や液体と粉体とを攪拌・混合・分散する工程（以後、混合工程と呼ぶ）がある。近年、化学工業の著しい発展により、混合工程に対し、高速化・分散粒子の均一化といった技術的な要求ばかりでなく、経済性に対する要求も高まっている。現在、様々な種類の混合装置が利用されているが、その多くは、攪拌槽内にある回転翼を回転させることで混合を行うタイプである。しかし、回転翼型の混合装置は、処理量の増大によって、装置規模が大きくなり設備コストが高くなる。さらに、混合効率が悪く、ダマ（粉体の未溶解固形物）の生成による不良品の発生、バッチ処理であるため連続的に処理が行えないといった問題を抱えている。

回転翼型の混合装置がもつ問題点を解決したのとして、機械駆動式振動型混合装置<sup>1)</sup>が実用化されている。

a)機械システム工学専攻大学院生

b)機械設計システム工学科教授

c)教育研究支援センター技術専門職員

この振動型混合装置は、円筒容器内で螺旋状の振動エレメントを上下に往復運動させることにより効率的に液体や粉体の混合を行う混合装置である。振動型混合装置は、回転翼型の混合装置では困難であった、混合工程を連続化することが可能であること、低粘度から高粘度の液体を効率的に混合することが可能であるといった利点を持っている。

本研究では、従来の振動型混合装置の更なる高性能化を図るため、磁気浮上攪拌翼（以後、攪拌翼と呼ぶ）を用いた振動型混合装置の開発を行う。本研究において開発する混合装置では、攪拌槽内で磁気力により浮上する攪拌翼を、攪拌槽外部に設置された加振機構からの周期変動磁場により加振することで、攪拌槽内部の液体や粉体は周囲環境から完全に分離される。それにより、機械駆動式振動型混合装置が持つ、不純物混入などの問題を克服することができる。既報<sup>2)</sup>の研究では、攪拌翼を加振させる方法として、攪拌翼に取り付けられた永久磁石と攪拌槽外部に設置された加振装置に取り付けられた永久磁石の間に発生する磁気反発力を用いる方法を採用していた。本研究では、攪拌翼の加振方法に、攪拌槽外部に設置したコイルに交流電流を流すことで発生する周期変動

磁場を利用した電磁加振式を採用している。加振方法にコイルを用いることで、加振機構が簡単になり、混合装置の小型化が期待できる。従来の機械駆動式振動型混合装置においては、加振周波数が 15Hz 以上で、攪拌翼の両振幅値が 6mm 以上の場合、十分な攪拌・混合処理が可能であるとの実績がある。そこで、本研究では、液体中において攪拌翼の加振周波数 15Hz 以上で、攪拌翼の両振幅値 6mm 以上の運動を実現することを当面の目標とし、混合装置の開発を行った。

本研究では、加振方法にコイルを用いた電磁加振式振動型混合装置の試作機の製作を行い、水中での攪拌翼の振動特性を調査した。本論文では、この装置の概要を説明するとともに、水中で電磁加振させた攪拌翼の運転実験を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 電磁加振式振動型混合装置の構造

### 2.1 基本構造

本研究で製作した電磁加振式振動型混合装置の全体図を図 1、概略図を図 2 に示す。本混合装置は、攪拌槽、攪拌翼、攪拌翼加振用コイル（以後、コイルと呼ぶ）から構成されている。本混合装置では、攪拌槽内に永久磁石の磁気力によって磁気浮上する磁気浮上攪拌翼を、攪拌槽外部に取り付けているコイルにより発生する交流磁場によって上下に振動させることで液体・粉体の混合を行う。実用化されている機械駆動式振動型混合装置では、攪拌槽下部に設けられた液体注入口より混合対象の液体・粉体を注入し、上下に振動する振動エレメントによって混合された後、攪拌槽上部の液体排出口より排出される仕組みになっているが、本研究においては、液中での攪拌翼の振動特性の調査を目的としているため、液体の注入・排出口は設けず液体を攪拌槽内に予め注入した状態で攪拌翼を振動させている。

### 2.2 攪拌槽

本混合装置は、内径 44mm、高さ 150mm の円筒型攪拌槽（アクリル製）の中で攪拌翼を上下に往復運動させることで、攪拌・混合処理を行うものである。（図 2 参照）図 3 に攪拌プレート、中空シャフト、永久磁石（ネオジム磁石）より構成されている攪拌翼を示す。攪拌プレートは、図 4 に示すように、外径 40mm の円形型となっており、中心には中空シャフトに取付けるために M16 のねじ穴を設けている。その周りに  $\phi 8\text{mm}$  の液体通過用の穴を 4 箇所あけている。攪拌翼の磁気浮上用磁石である、外径  $\phi 30\text{mm}$  × 内径  $\phi 25\text{mm}$  × 高さ 9mm の永久磁石をここでは磁石 a と呼ぶ。攪拌翼の両端に磁石 a を 2 つ結合させ、1 つの磁石 A<sub>1</sub> (A<sub>2</sub>) としたものをタイプ I、磁石 a を 1 つのみ使用するものをタイプ II と呼ぶ。本混合装置では、攪拌翼の磁気浮上部に受動型磁気軸受<sup>3), 4)</sup>を参考にした磁石配置を採用している。既報<sup>2)</sup>の研究で製作した振動型混合装置では、攪拌翼の両端に取り付けられた永久磁

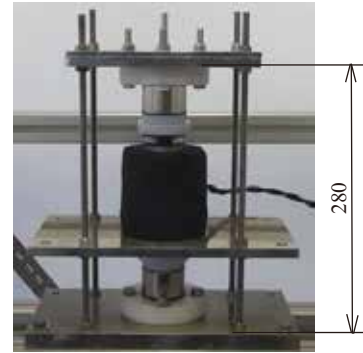


図 1. 電磁加振式振動型混合装置の全体図。

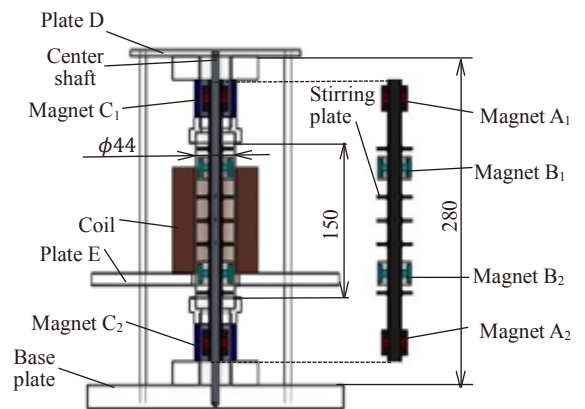


図 2. 電磁加振式振動型混合装置の概略図。

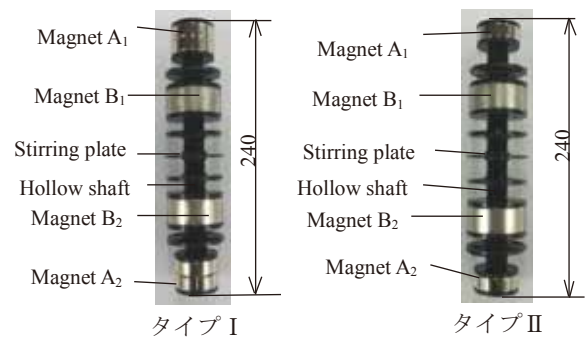


図 3. 攪拌翼。

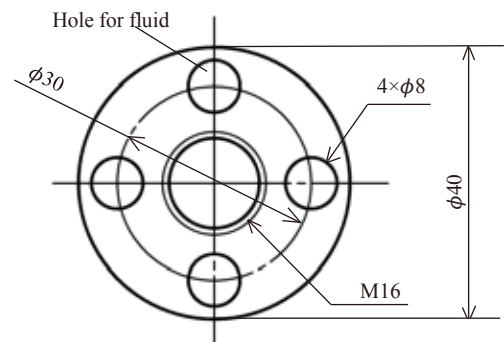
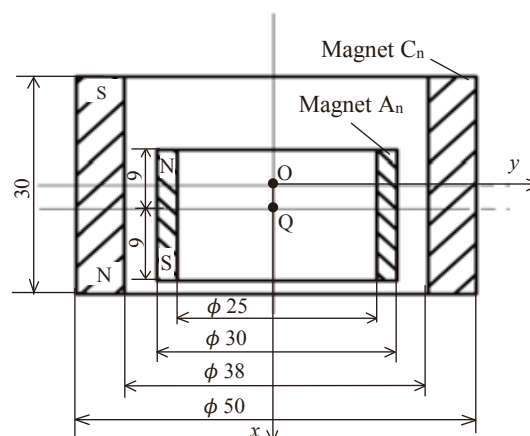


図 4. 攪拌プレート。

石と、その上下に取り付けられた永久磁石の磁気反発力によって攪拌翼を攪拌槽内に磁気浮上させていたが、その方式での磁気浮上では、攪拌翼にセンターシャフトを通し、攪拌翼の運動を上下方向のみに拘束する必要があった。センターシャフトにはすべり軸受の設置が必要であり、その攪拌翼から発生する摩耗痕などの不純物が攪拌槽内に混入する可能性があった。そこで、受動型磁気軸受<sup>4)</sup>を参考に、磁気浮上部の磁石対  $A_n$ - $C_n$  ( $n=1,2$ ) を図 5 に示すように配置した（ただし、タイプ 1 の場合）。攪拌翼の両端に取り付けられた永久磁石  $A_n$  を囲むように磁石  $C_n$  を設置し、磁石対  $A_n$ - $C_n$  の間に働く磁気力によって攪拌槽内で攪拌翼を磁気浮上させる。表 1 に磁石の仕様を示す。しかし、本研究においては、永久磁石のみによる攪拌翼の安定な磁気浮上が実現できなかったため、センターシャフトを用いて攪拌翼の運動を上下方向のみに拘束している（図 2 参照）。

### 2.3 攪拌翼加振用コイル

本研究で用いたコイルの外観を図 6、このコイルの仕様を表 2 に示す。コイルは、形状が内径 50mm、外径 100mm、長さ 90mm である（図 7 参照）。このコイルは、電流（交流、直流）4A を 3 時間流し続けても発熱温度が 60℃ で飽和するように設計されている。コイルは、プレート E に長さ方向が鉛直になるように固定され、コイルの内側に外径 48mm の攪拌槽が設置されている。図 7 にコイルに通電を行っていない場合のコイルと永久磁石  $B_n$  ( $n=1,2$ ) の初期配置を示す。コイルは、図 7 に示すように攪拌翼に取り付けた永久磁石  $B_n$  を囲むように取り付けられる。また、永久磁石  $B_n$  の位置は、これまでの研究にて、永久磁石  $B_n$  の高さ方向の中心点  $R_1$ 、 $R_2$  がコイルの上面、底面と一致する点に設置した時、コイルから受ける電磁気力が最も大きくなることを確認しており、それをもとに永久磁石  $B_n$  の位置を決めている。コイルに通電時に使用する機器を図 8 に示す。コイルにより発生する交流磁場の周波数は、関数発生器により設定した。この関数発生器



（ただし  $n=1,2$ ）

図 5. 攪拌翼磁気浮上部の磁石対  $A_n$ - $C_n$ .



図 6. 本混合装置に用いたコイル.

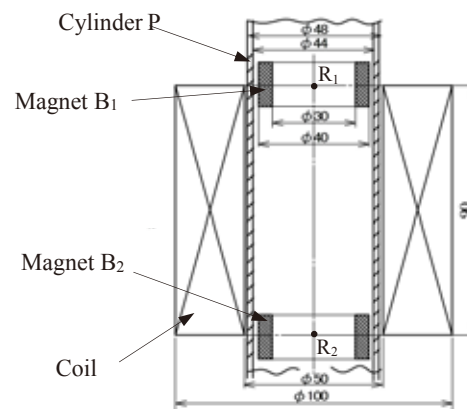


図 7. コイルと永久磁石  $B_1$ 、 $B_2$  の初期位配置

表 1. 永久磁石の仕様

| Magnet | Size[mm]                           | Magnetic flux density[mT] | Grade |
|--------|------------------------------------|---------------------------|-------|
| a      | $\phi 30 \times \phi 25 \times 9$  | 415                       | 40    |
| $B_n$  | $\phi 40 \times \phi 30 \times 16$ | 500                       | 40    |
| $C_n$  | $\phi 50 \times \phi 38 \times 30$ | 504.5                     | 40    |

（ただし、 $n=1,2$ ）

表 2. コイルの仕様

| Size[mm]    |                           | $\phi 100 \times \phi 50 \times 90$ |
|-------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Copper wire | Diameter[mm]              | $\phi 1.7$                          |
|             | Number of windings        | 644                                 |
|             | Heatproof temperature[°C] | 180                                 |

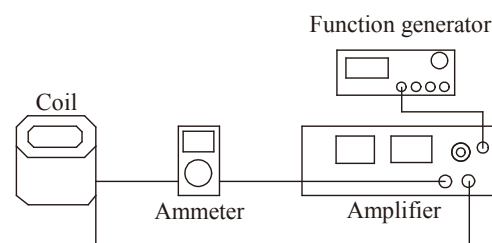


図 8. コイルに通電時に使用する機器.

から出力された電流を増幅器により増幅させ、コイルに通電を行う。コイルと増幅器の間に電流計を接続し、この電流計でコイルに流れる電流値を計測した。

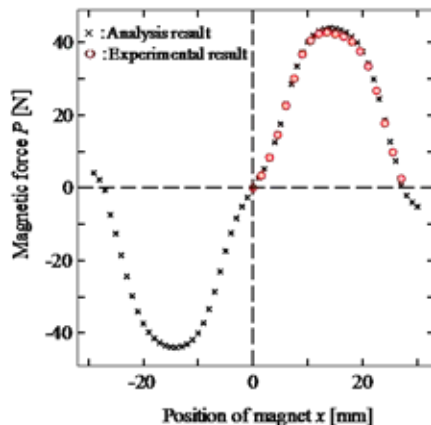


図 9. 磁気力の解析結果と実験結果の比較.

### 3. 磁気力の解析及び測定実験

#### 3.1 有限要素法による磁気力の解析

本研究では、攪拌翼磁気浮上部に用いた永久磁石対  $A_n$ - $C_n$  間の磁気力を有限要素法磁場解析ソフト (3 次元磁場解析 FEM、ミューテック社  $\mu$ -MF) を用いて解析を行う。この解析ソフトは、各格子点の磁場を 3 次元的に解析することができ、磁石やコイルから発生する磁場を確認できるだけでなく、磁石同士の反発 (吸着) 力や直流・交流電流を流したコイルから磁石が受ける電磁気力の計算も可能である。

##### 3.1.1 解析条件

磁気力の解析モデルは図 5 であり、タイプ I の場合について磁気力の解析を行った。本解析では、磁石  $C_n$  の中心点  $O$  を座標原点とした。座標原点から磁石  $A_n$  の中心点  $Q$  が移動した距離を  $x$  [mm] とした。磁石  $A_n$  の位置を座標原点  $O$  から  $x$  軸方向へ 1mm ずつ変更し解析を行った。磁石  $A$ 、 $C$  の磁極は図 5 に示す通りである。

##### 3.1.2 解析結果

図 9 に磁気力の解析結果を示す。図 9 中の  $\times$  が解析結果を表しており、横軸は磁石  $A_n$  の座標原点  $O$  から移動させた際の距離  $x$  [mm]、縦軸は磁石  $C_n$  が受ける磁気力  $P$  [N] を示している。図 9 より磁石  $C_n$  の受ける磁気力は  $x=0$  mm の時に約 0 N と最も低く、 $x=14$  mm の時、約 44 N と最も高くなることが確認できる。解析結果より、 $x=0$  mm 近傍において磁石対  $A_n$ - $C_n$  は、ハード型の非線形ばね特性を有し、 $x$  が大きな位置ではソフト型非線形ばね特性を有することが確認できる。なお、本混合装置の攪拌翼の両振幅値は、水中において最大でも 10 mm 程度であることから、装置を実際に稼働させる際には、ハード型の非線形ばね特性を利用することになる。

#### 3.2 磁気力測定実験

磁石対  $A_n$ - $C_n$  の磁気力測定実験を行う。本実験では、磁気力測定の結果を磁気力の解析結果と比較することで、磁場解析ソフトの有効性を確認する。また、磁気力測定実験の結果を用いて磁石対  $A_n$ - $C_n$  の磁気ばね近似式を作成する。



図 10. 磁気力測定実験装置の全体図.

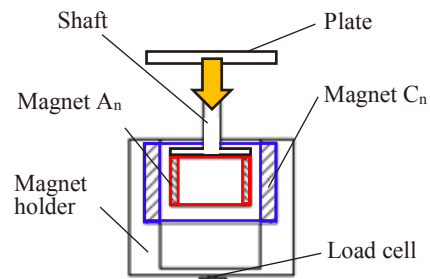


図 11. 磁気力測定実験装置の概略図.

##### 3.2.1 磁気力測定の実験方法

図 10 に磁気力測定実験装置の全体図を、図 11 に磁気力測定実験装置の概略図を示す。本実験では、上記の磁気力の解析と同様に、磁石  $C_n$  の高さ方向の中心点  $O$  から磁石  $A_n$  の高さ方向の中心点  $Q$  の距離を  $x$  [mm] とした。図 11 に示すように、磁石  $C_n$  を磁石保持器に固定し、その下にロードセルを設置する。装置上部のプレートは、シャフト及び磁石  $A_n$  と一体になっており、プレートを押し下げていくことで永久磁石  $A_n$  位置を変更させて実験を行った。本実験では、プレートの移動量をレーザ変位計を用いて測定し、磁石  $A_n$  の移動量とした。そして、磁石  $A_n$  を  $x=0$  mm の位置から 0.5 mm ずつ押し下げ、各移動点における磁気力の測定を行った。この時、各移動点においてロードセルから出力された信号を動ひずみ計に入力し、PC に取り込みデータを処理した。

##### 3.2.2 磁気力測定実験の実験結果

磁気力測定の結果を図 9 中に  $\circ$  で示す。解析結果と同様に、 $x=0$  mm 近傍ではハード型、 $x$  が大きな位置ではソフト型の非線形ばね特性を持っている。また、図 9 に示す磁気力の解析結果と実験結果を比較すると良い一致が見られた。このことから、磁場解析ソフトの有効性を確認することができた。磁場解析ソフトの有効性が確認できたことから、今後は、装置の製作を行う前に、磁場解析ソフトを用いて装置に用いる磁石間に働く磁気力の解析を行うことができると考えられる。

### 3.2.3 磁気ばね近似式の作成

攪拌翼の磁石対  $A_n$ - $C_n$  の磁気ばね近似式は磁気力測定実験結果に対し最小二乗近似を用いて作成した。本研究では、7 次の近似式を用いて作成した。磁気ばね近似式は、

$$\bar{P}(x) = \sum_{i=0}^7 C_i x^i \quad (1)$$

である。式 (1) における定数  $C_0 \sim C_7$  を表 3 に示す。実験結果とその近似曲線を図 12 に示す。図 12 から分かるように、高精度で近似できていることが確認できる。この近似式を用いた、本混合装置の攪拌翼の運動方程式は次式、

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \left( \frac{dx}{dt}, \omega \right) + 2\bar{P}(x) - mg = F \sin \omega t \quad (2)$$

となる。ここに、

$$\left. \begin{array}{l} m[\text{kg}] : \text{浮上体質量}, \quad g[\text{m/s}^2] : \text{重力加速度} \\ x[\text{mm}] : \text{両振幅値}, \quad c[\text{Ns/m}] : \text{減衰力} \\ \omega[\text{rad/s}] : \text{加振周波数}, \quad F[\text{N}] : \text{磁気力振幅} \end{array} \right\} \quad (3)$$

である。式 (2) 中の磁気力振幅  $F[\text{N}]$  は、上記の磁場解析ソフトを用いて求めることができる。減衰力項  $c[\text{Ns/m}]$  は、攪拌翼の速度および振動数の関数となることが考えられる。減衰力については、今後、位相法を用いた実験などを実施して明らかにしていく計画である。

## 4. 水中における攪拌翼の振動特性

### 4.1 実験方法

本実験では、駆動源であるコイルに交流電流を流し、攪拌槽内を水で満たした状態で攪拌翼を振動させた。コイルに流す交流電流の加振周波数  $f$  を 3~20Hz まで 0.1Hz 刻みに増加させた。加振周波数における攪拌翼の p-p 振幅（以後、振幅と呼ぶ）を測定し、攪拌翼の振幅の周波数応答曲線を作成した。コイルに流す交流電流値（実行値） $i$  は 2.86A、4.00A である。攪拌翼に両端に取付ける永久磁石は、図 3 に示すタイプ I、II で実験を行った。攪拌翼の振幅は、レーザ変位計を用いて測定する。

### 4.2 実験結果

図 13 にタイプ I の場合で交流電流値を 2.86A、4.00A とした場合の攪拌翼の振幅の周波数応答曲線を示す。一方、図 14 はタイプ II のものである。横軸は加振周波数  $f$  [Hz]、縦軸は攪拌翼の振幅  $X_p$  [mm] である。図 15 と図 16

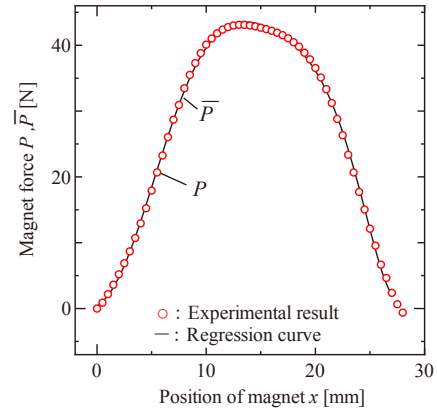


図 12. 磁気力測定実験結果と近似曲線.

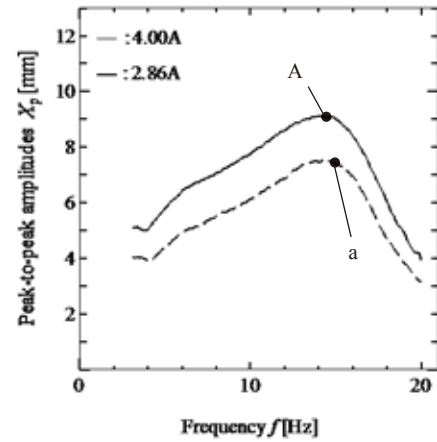


図 13. 攪拌翼の両振幅の周波数応答曲（タイプ I）

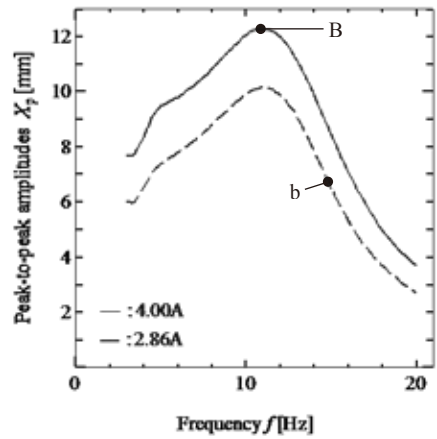


図 14. 攪拌翼の両振幅の周波数応答（タイプ II）

表 3. 式 (1) における磁気ばね近似式の定数.

|       |                       |       |                        |
|-------|-----------------------|-------|------------------------|
| $C_0$ | $2.51 \times 10^{-1}$ | $C_4$ | $-2.53 \times 10^{10}$ |
| $C_1$ | $1.23 \times 10^3$    | $C_5$ | $1.75 \times 10^{12}$  |
| $C_2$ | $2.74 \times 10^5$    | $C_6$ | $-5.36 \times 10^{13}$ |
| $C_3$ | $1.25 \times 10^8$    | $C_7$ | $6.16 \times 10^{14}$  |

には、交流電流 4.00A 時の共振周波数における攪拌翼の振動波形（図 13 の A 点、図 14 の B 点）を示す。また、図 17 と図 18 には、交流電流値 2.86A、加振周波数 15.0Hz 時（図 13 の a 点、図 14 の b 点）の攪拌翼の振動波形を示す。図 13 よりタイプ I の場合の共振周波数と振幅は、交流電流値が 2.86A の時、共振周波数が 14.3Hz、そのときの攪拌翼の振幅は 7.29mm であった。また、交流電流値が 4.00A の時は、共振周波数が 14.4Hz、攪拌翼の振幅は 8.64mm であった。一方、図 14 から、タイプ II の場合の共振周波数と振幅は、交流電流値が 2.86A の時は、共

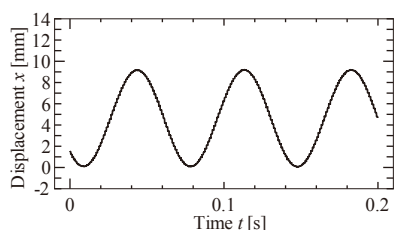


図 15. 攪拌翼の振動波形  
(図 13 の A 点、 $i=4.00\text{A}$ 、 $f=14.4\text{Hz}$ ) .

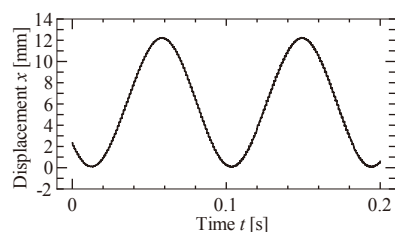


図 16. 攪拌翼の振動波形  
(図 14 の B 点、 $i=4.00$ 、 $f=11.0\text{Hz}$ )

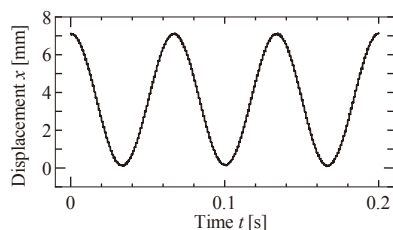


図 17. 攪拌翼の振動波形  
(図 13 の a 点、 $i=2.86\text{A}$ 、 $f=15.0\text{Hz}$ ) .

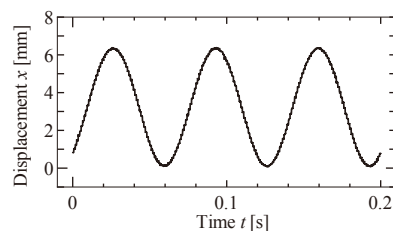


図 18. 攪拌翼の振動波形  
(図 14 の b 点、 $i=2.86\text{A}$ 、 $f=15.0\text{Hz}$ ) .

振周波数が  $10.7\text{Hz}$ 、そのときの攪拌翼の振幅は  $10.20\text{mm}$  であった。また、交流電流値が  $4.00\text{A}$  の時は、共振周波数が  $10.8\text{Hz}$ 、攪拌翼の振幅は  $12.27\text{mm}$  であった。コイルに流す電流値を大きくすることで、攪拌翼の振幅は大きくなった。また、タイプ I と II の実験結果を比較すると、磁石対  $A_n-C_n$  の間に働く磁気力が小さくなると共振周波数は小さくなるが、振幅が大きくなることが確認できた。本混合装置における、攪拌翼の固有振動数は、磁気浮上用磁石対  $A_n-C_n$  の磁気ばねの硬さによって調整できる。攪拌・混合対象となる物質の特性に合わせ、攪拌翼の固有振動数を調整した上で、共振点近傍の周波数域で混合装置を運転することによって、効率的に攪拌・混合処理を行えるものと期待できる。また、従来の機械駆動式振動型混合装置においては、加振周波数が  $15\text{Hz}$  以上で、攪拌翼の両振幅値が  $6\text{mm}$  以上の場合、十分な攪拌・混合処理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において、水と同等の物性を持つ液体に対しては、従来の機械駆動式振動型混合装置の運動条件を満足するような攪拌翼の運動を実現することができた。

## 5. 結論

本研究では、攪拌槽内で永久磁石の磁気力によって浮上する磁気浮上攪拌翼を用いた振動型混合装置の開発を目的とし、攪拌翼の加振方法として、攪拌槽外部に設置したコイルによる変動磁場を用いる方法について検討を行った。製作した装置は、攪拌翼を磁気浮上させる方法として、受動型磁気軸受を参考にした磁石配置を用いたが、本研究では永久磁石のみでの安定な磁気浮上は行えなかった。攪拌槽内で攪拌翼をセンターシャフト無しで

完全に磁気浮上できれば、振動型混合装置の更なる高性能化が目指せると考えられる。磁気力の解析と実験により、攪拌翼磁気浮上部の磁石配置がどのような磁気ばね特性を有しているか確認することができた。磁気力測定の結果を用いて、本混合装置における攪拌翼の運動方程式を導出するのに必要な磁気ばね近似式を作成した。しかし、運動方程式には水中での攪拌翼の減衰力も必要とするため、今後、位相法を用いた減衰力の測定などを行い、運動方程式を導出し、攪拌翼の運動解析を行っていく計画である。また、コイルによる電磁力を用いることで、水中においても攪拌翼を十分な加振周波数と振幅で振動させることが可能であることを確認した。今後は、実用化に向けて更なる改良を行っていく予定である。

終わりに、本研究は、平成 27 年度科学研究費基盤研究 (C) の補助を受けたことを付記し、関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 大村 直人, 小村 崇信ほか 4 名: 振動型混合装置 "VIBRO MIXER<sup>®</sup>" の混合特性, 化学工学論文集, 第 30 巻, 第 1 号, pp. 1-6, 2004.
- 2) 竹下 浩史, 岡部 匡ほか 3 名: 磁気浮上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, 第 43 号, pp. 153-158, 2014.
- 3) 水野 毅, 関口 秀樹, 荒木 献次: 永久磁石の運動制御を利用した反発型磁気軸受に関する研究 (アキシヤル方向の安定化制御), 日本機械学会論文集 (C 編), 第 64 巻, 628 号, 1998.
- 4) 大路 貴久, 東 剛人ほか 4 名: 永久磁石反発を用いた磁気浮上天秤の試作, 日本 AEM 学会誌, Vol. 9, No. 4, 2001.