

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)

竹下 浩史^{a)}・岡部 匡^{b)}・濱畑 貴之^{c)}・挾間 雄太^{a)}・尋木 俊介^{a)}

Development of Vibration Mixer Using Magnetically Levitated Fin (Extension of Mixing Unit and Improvement of Excitation Device)

Hirofumi TAKESHITA, Tadashi OKABE, Takayuki HAMAHATA,
Yuta HASAMA, Syunsuke TAZUNOKI

Abstract

In order to improve the efficiency in agitation process, the mixer using a vibration blade with reciprocating motion is developed. This stirring fin is levitated by repelling force of permanent magnet and executes vibrating motion in cylinder vessel. In order to increase the resonance frequency of the vibration of stirring fin, mixing device is improved. The magnetic levitation system of the mixer is improved by using waterproofed neodymium magnets. One mixing unit is composed of three disc-shaped mixing plate that are moved integrally. Developed mixer have three mixing unit and those are serially arranged. In order to excite the stirring fin strongly by magnetic repulsive force, excitation device is developed. The excitation device is disc assembled two neodymium magnets, and then repulsive force to the stirring fin is generated periodically by rotating the disc. A prototype of mixer is manufactured. In order to investigate vibration characteristics of the stirring fin, some experiments are performed. The frequency responses of amplitude of the stirring are shown. When the stirring fin is excited in agitation vessel filled with water, the resonance frequency of the stirring fin is about 19Hz, and peak-to-peak amplitude of the stirring fin is about 1.94mm at the resonance frequency.

Keywords: Nonlinear vibration, Forced vibration, Vibratory mixer, Vibration blade, magnetically levitated blade

1. はじめに

攪拌・混合操作は、各種物質の生産プロセスにおいて、重要な基本単位操作の一つである。近年、種々の物質生産において、物質の攪拌・混合工程に対して、高速度化と高精度化、及び分散粒子の高均一化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で混合・攪拌操作を行うものが主流である。このタイプ以外では、液体混合の目的や混合の対象となる物質・製品の特性により、噴流混合装置、エアリフト、スタティックミキサーなど非常に多くの種類の混合装置が使用されている。

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。回転翼型の混合装置においては、混合効率を改善するために、様々な攪

拌翼が利用されている。低粘度液体用としてはプロペラ翼、ディスクタービン翼、平パドル翼、高粘度液体用攪拌翼としてはアンカー翼、ヘリカルリボン翼などが広く使用されており、攪拌翼の形状の相違は、液体の混合効率に大きな影響を及ぼす¹⁾²⁾。回転翼型の混合装置は、回分操作を基本とするため、時間効率の点から不利である。また、攪拌翼の回転運動及び邪魔板の作用により、液体塊の変形・細分化する方法は、混合効率の点から最良の方法とは言えず、処理量が多くなれば、装置規模が大きくなり、設備コストが高くなる。

一方、均一な混合が得られるという振動型の混合と連続操作の長所を持ち合わせた混合装置として振動式ミキサーが開発されている³⁾⁴⁾。この振動型ミキサーは、円筒状攪拌槽内で、螺旋状の攪拌翼を振動させ、効率的に液体の混合操作を行うものであり、従来の攪拌槽型の混合装置に代わり、新たな高効率混合装置として期待されている。

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翼を利用した振動型ミキサ

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

一の開発を行う。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だった攪拌槽内と外部環境との完全な分離が可能となる。また、使用する永久磁石の磁石間距離を変化させることで磁気反発力を調整でき、振動系の固有振動数（共振点）を変化させることが容易である。磁気ばね振動系による非線形共振を発生させ、攪拌翼を大振幅かつ高振動数域で振動させることで混合効率の向上が期待できる。既報^{5),6)}の研究で製作した振動型ミキサーは、一つの混合ユニットのみで構成されるものであったが、本研究では、3個の混合ユニットを直列に配置した新たな振動型ミキサーを試作した。また、磁気浮上型攪拌翼の励振方法にも改良を加え、より強い磁気加振力が攪拌翼に作用するように改良を行った。本報告では、今回試作した振動型ミキサーの概要を説明するとともに、攪拌槽内の攪拌翼の振動実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 振動型ミキサーの構造

2.1 基本構造

本研究で製作した振動型ミキサーの全体図と攪拌部の詳細図を図1, 2に示す。本ミキサーは、図1に示すように、攪拌部と加振部から構成される。混合すべき2種類の液体は、図1に示す攪拌部下部のパイプ P₂ の液体流入口から注入される。振動する攪拌翼により混合された後、攪拌部上部のパイプ P₁ の液体排出口から混合後の液体が排出される。本ミキサーの攪拌翼は、攪拌槽内で磁気反発力により浮上している。この攪拌翼に対し、外部から周期変動する磁気力を作用させて攪拌翼を励振し攪拌を行う。この機構の採用により、攪拌槽内部の液体と外部環境の分離が可能となり、従来の振動型ミキサーで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。

2.2 攪拌部

攪拌部は、内径 50mm の2個の中空パイプ P₁, P₂, P₃, P₄ と3個の混合ユニットで構成されている。混合ユニット M₁~M₃ (図1参照) は、それぞれ内径 40mm の3個の中空パイプを使用している。これらのパイプの間には、中心に液体の通路となる直径 25mm の穴を有する4個の仕切り板 Q₂~Q₅ が設置されている。磁気浮上用磁石 A₁, A₄ は、磁石保持器設置用仕切り板 Q₁, Q₆ 内に固定されている

攪拌フィンが往復運動する混合ユニット M₁~M₃ が実際に混合を行う部位である。図3に混合ユニットの構造を示す。一つの混合ユニットには、直径 38mm、厚さ 3mm、翼間 6mm の円板形の攪拌プレート (図4参照。以後、攪拌プレートと呼ぶ) 3枚が、内径 40mm の円筒容器内に設置されている。この3枚の攪拌プレートは一本の中空軸 (以後 攪拌シャフト S 呼ぶ) 上に設置され、この攪拌シャフト S は、攪拌槽の中心に固定されているセンターシャフトに沿って鉛直方向に運動する。各攪拌プレートには直径 4mm の4個の穴があり、この穴を液体が通過する。

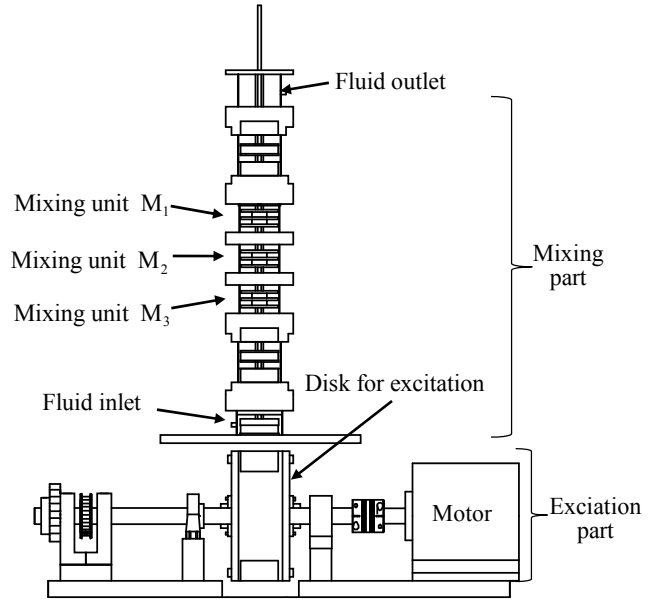


図1. 振動型ミキサーの全体図.

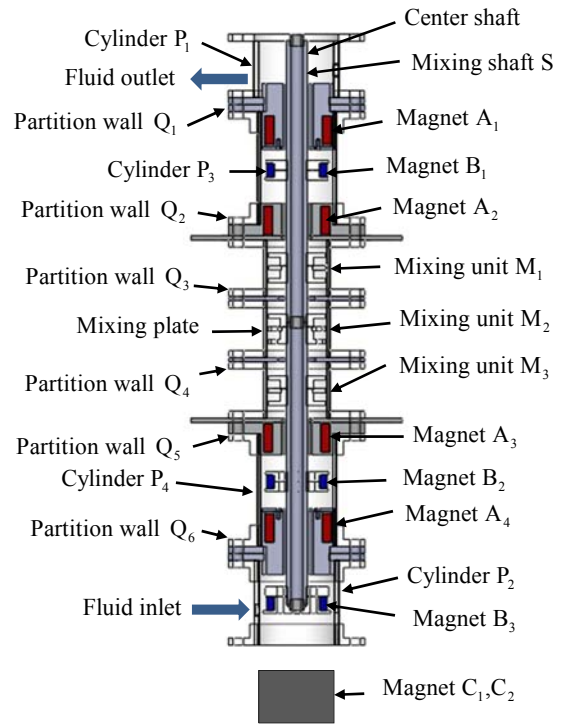


図2. 振動型ミキサーの攪拌部.

3枚の攪拌プレートの液体通過穴は、互いに円周方向に45°位相を違えるように設置している。

本研究で製作したミキサーは、上記の攪拌ユニット3個で構成され、この3個の同型のユニットを直列に連結している。なお、この混合ユニットは、さらに追加設置することも可能な構造としている。このように混合ユニットを適宜追加していくことにより、混合・融解が非常に困難な物質の混合処理にも対応できるよう配慮した構造となっている。図5に示すように、各混合ユニット内の3枚の攪拌

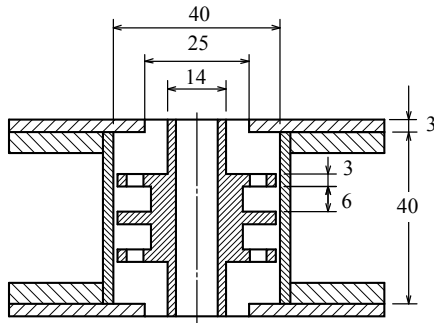


図 3. 混合ユニット.

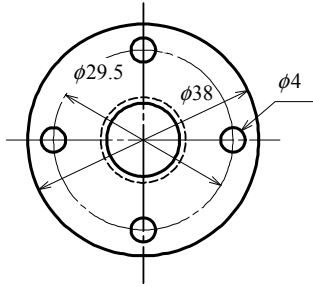


図 4. 攪拌プレート.

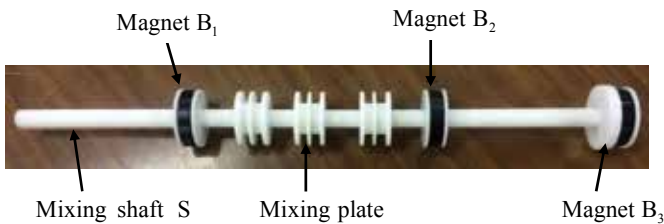
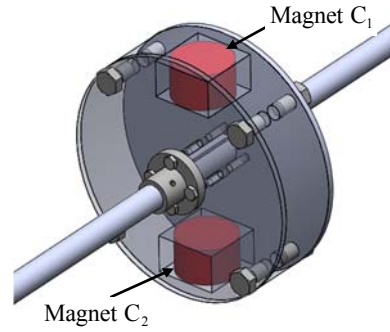


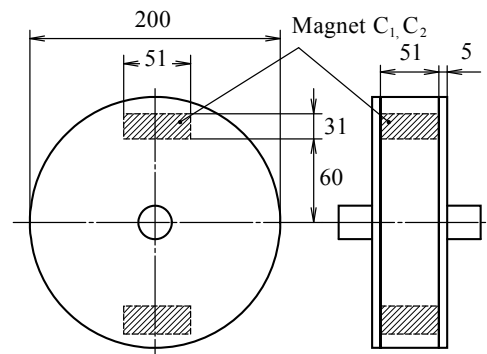
図 5. 攪拌フィン全体図.

プレートは、他の混合ユニット内の攪拌プレートと同一の攪拌シャフト S 上に取り付けられている。また、この攪拌シャフト S には、攪拌フィンを磁気浮上させるための永久磁石 B₁、B₂、加振用磁石 B₃ が取り付けられている。永久磁石 B₁、B₂、B₃ と 9 枚の攪拌プレートは一体となって運動する。以後、攪拌プレート、永久磁石 B₁、B₂、B₃ 及び攪拌シャフト S で構成される構造体を総称して攪拌フィンと呼ぶことにする。永久磁石 B₁、B₂ は、攪拌槽内の液体に直接接触するため、磁石表面に特殊加工を施した防水・防錆仕様の磁石を採用を使用した。この磁石の採用により、磁石を直接液体に浸すことが可能となり、攪拌プレートの外径を小さくすることができ、攪拌フィンの軽量化を実現することができる。

永久磁石 B₁ を挟み込むように永久磁石 A₁、A₂、さらに永久磁石 B₂ を挟み込むように永久磁石 A₃、A₄ を設置した。これらの A₁~A₄ の永久磁石は、仕切り板 Q₁、Q₂ 及び Q₃、Q₆ 内に設置している。この永久磁石 A₁、A₂ と B₁、永久磁石 A₃、A₄ と B₂ は、それぞれ同極を対向させて配置している。このように二つの永久磁石では挟み込む方式を採用することにより、攪拌フィンが構成する振動系の復元力を漸硬型非線形ばね特性とすることができる。永久磁石



(a) 加振部全体図



(a) 加振部の円板

図 6. 加振部.

表 1. 磁石の仕様.

Neodymium magnet	Size [mm]	Adsorptive Power [N]	Surface treatment
A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄	φ44×φ32×20	343	
B ₁ , B ₂ , B ₃	φ40×φ30×10	195	Waterproofing
C ₁ , C ₂	φ50×30	862	

B₁、B₂ の取り付け位置は、攪拌シャフト S 上を移動できる構造とし、永久磁石 B₁-A₁、B₁-A₂、B₂-A₃、B₂-A₄ 間の磁石間距離を調整することで、攪拌フィン振動系の磁気ばね力の強さを容易に変更できる構造とした。このため、攪拌フィン振動系の固有振動数を容易に変更でき、強制振動時の共振振動数を調整することができる。攪拌シャフト S の最下端に設置している永久磁石 B₃ は、攪拌槽外部からの磁気力の作用を直接受けるものである。すなわち、攪拌槽外部に設置した永久磁石 C₁、C₂ の磁気力が、この永久磁石 B₃ に作用する。永久磁石 B₃-C₁、B₃-C₂ 間の反発力が周期的に変動することにより攪拌フィンは励振される。

攪拌槽内の液体の運動が確認できるように、すべての攪拌槽容器にはアクリルパイプを使用した。アクリルパイプ、ベースプレート、仕切り板の間には液漏れを防ぐため、ゴムシートを挟んで厳重なシールを行った。また、仕切り板内の永久磁石 A₁~A₄ の磁石保持器内にもゴムシートを使用し、内部の磁石 A₁~A₄ を攪拌槽内の液体に触れない構造とした。

2.3 加振部

加振部の構造を図6に示す。加振部は、ACモータの動力軸に直結した直径200mm、厚さ51mmの円板を回転させる簡単なものである。円板内には永久磁石C₁,C₂が組み込まれている。不つり合い慣性力の発生をなくすために駆動軸の中心に対して対称な位置に同じサイズの永久磁石2個を配置した。モーターが回転すると永久磁石C₁,C₂が回転し、その磁気力が攪拌フィンの最下部の永久磁石B₃に作用する。永久磁石C₁,C₂と永久磁石B₃は、反発力が発生するように互いに同極を対向させて配置させている。この加振方法の採用により、ACモータの回転数を変化させるのみで、攪拌フィンに作用する加振振動数を変更することができる。

なお、本装置で使用する磁石は、すべてネオジウム磁石を用いた。本ミキサーで使用した磁石の仕様を表1に示した。

3. 磁気反発力

攪拌フィンを浮上させるために利用しているB₁-A₁間の磁気反発力を測定した。永久磁石B₁を固定したプレートをロードセル[(株)共和電業 LM-2KA-P]と接するように水平な基礎部に設置し、永久磁石A₁を限りなく近づ

けた状態から徐々に鉛直上方に離していき、その時の磁石間距離と反発力を測定した。ロードセルから出力された信号を動ひずみ計[(株)共和電業 DPM-600]に入力した後、PCでデータを処理した。図7中の○印が磁気反発力F(x)の測定結果である。横軸は磁石間距離x[mm]、縦軸は磁気反発力F(x)[N]である。また、攪拌フィンに作用する復元力特性を把握するために、磁気反発力F(x)の近似式F_A(x)を作成した。磁気ばねの近似モデルの関数として次式を用いた⁷⁾。

$$\left. \begin{aligned} F_A(x) &= a\left(\frac{d}{x+b}\right)^p + c = \frac{e}{(x+b)^p} + c, \\ e &= ad^p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中の定数b,c,eを決定するために、最小自乗法を用いた。磁石間距離をx_j、磁石間の反発力の計測値をy_jとしたときの近似式の絶対誤差の二乗和は次式となる。

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^N \left(y_j - \frac{e}{(x_j+b)^2} - c \right)^2 \quad (2)$$

ここで、jは実験時に計測したデータの番号、Nはその総数である。回数定数b,c,eに関するεの停留条件∂ε/∂b=0, ∂ε/∂c=0, ∂ε/∂e=0から導かれる連立方程式

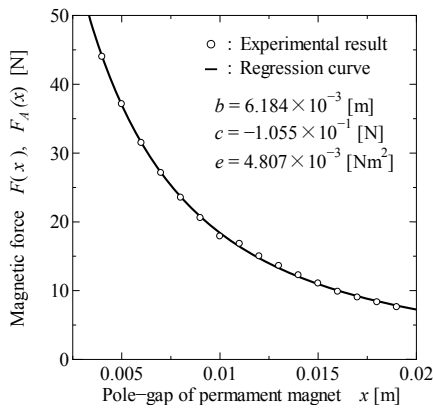


図7. 磁気反発力.

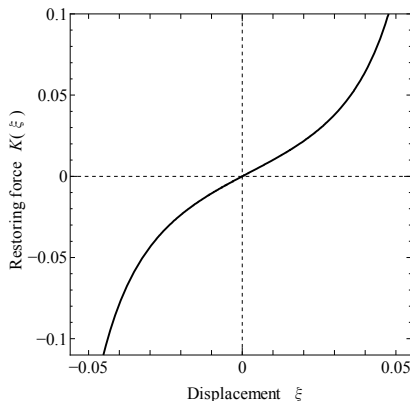


図8. 攪拌フィン振動系の復元力特性.

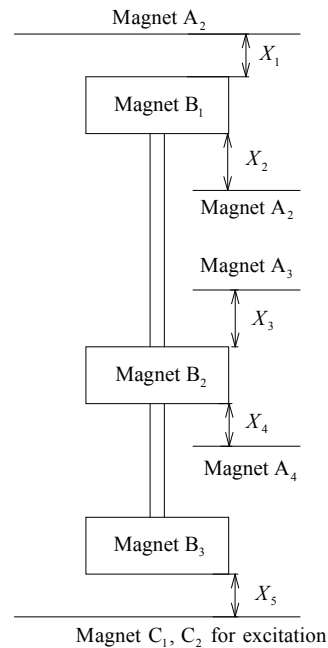


図9. 磁石間距離の定義.

表2. 磁石間距離のパラメータ.

Condition	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
I	7	8	9	7	30
II	4	5	12	6	34
III	9	8	10	7	34

※単位はすべて mm.

をニュートン法を用いて解くと、定数 b, c, e が決定できる。図 7 中には式(1)の近似式を用いた磁石 B_1-A_1 間の磁気ばね関数の同定結果を実線で示した。図 7 から式(1)による近似式は実験値とほぼ一致していることが確認できる。攪拌フィンには、磁石対 $B_1-A_1, B_1-A_2, B_2-A_3, B_2-A_4$ の磁気力がすべて作用する。図 8 には、攪拌フィンに作用するこれらの

復元力を足し合わせた攪拌フィンの復元力特性を示した。ただし、図 8 中の ξ は攪拌フィン鉛直方向の無次元化変位、 $K(\xi)$ は攪拌フィンに作用する無次元化磁気力である。ただし、紙幅の制約から、 $\xi, K(\xi)$ の定義は省略した。図 8 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もっていることが確認できる。

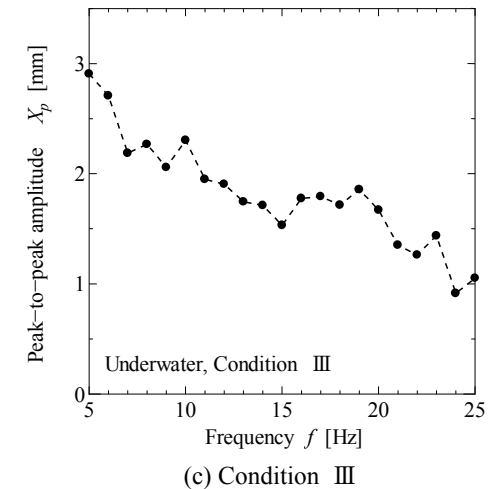
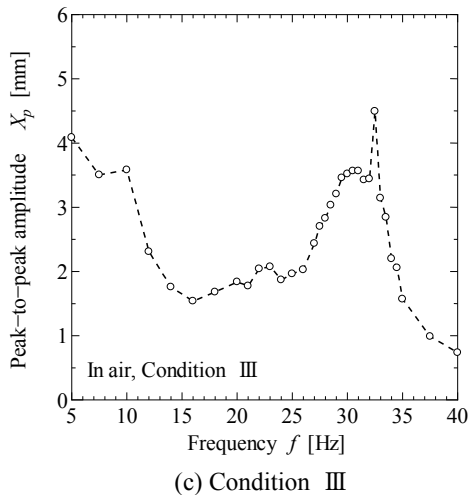
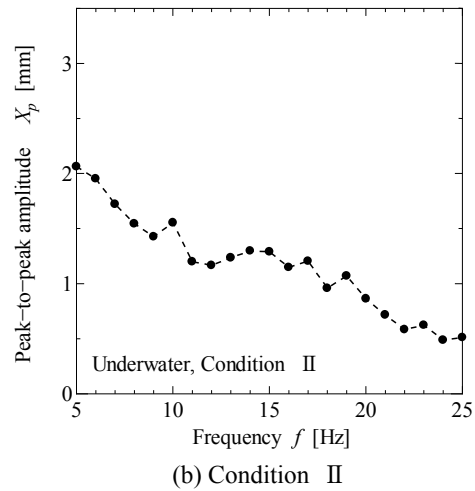
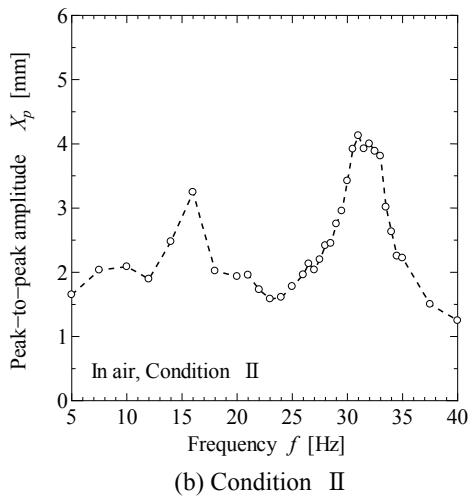
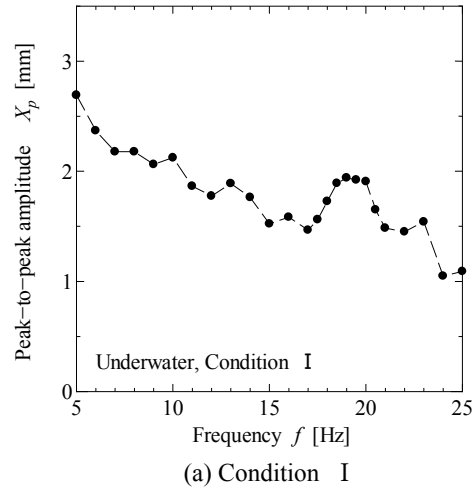
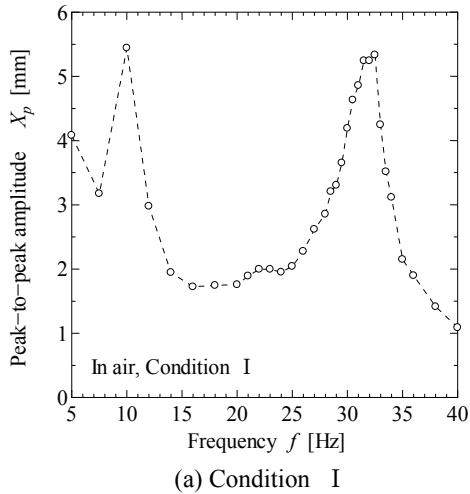


図 10. 攪拌フィンの p-p 振幅の周波数応答(空气中).

図 11. 攪拌フィンの p-p 振幅の周波数応答(水気中).

4. 実験結果

実験は加振部のモーターの運転周波数を変化させて攪拌フィンの p-p 振幅値を測定した。攪拌フィンの変位の計測には、レーザー変位計[(株)キーエンス LK-500]を使用した。攪拌フィンの上端にデータ収集用のプレートを取り付け、その変位をレーザー変位計で計測した。実験は、図 9 に示す磁石間距離 $X_1 \sim X_3$ の条件を変更して行った。実験で設定した磁石間距離の値を $X_1 \sim X_3$ を表 2 に示した。攪拌槽内が空の状態、攪拌槽内に液体(水)を満たした状態で実験を行い、それぞれの条件下における攪拌フィンの振幅の周波数応答曲線を求めた。攪拌槽内が空の状態では加振周波数 f は 5Hz から 40Hz まで 1Hz 刻みで増加させた。攪拌槽内が水で満たした状態では加振周波数 f は 5Hz から 25Hz まで 1Hz 刻みで増加させた。ただし、各条件における共振点付近では 0.5Hz 刻みで計測した。

攪拌槽を空にした場合の攪拌フィンの p-p 振幅の周波数応答を図 10 に示す。横軸は加振周波数 f [Hz]、縦軸が攪拌フィンの p-p 振幅 X_p [mm] である。攪拌槽内が空の場合、条件 I, II, III の攪拌フィンの共振周波数はそれぞれ 31Hz, 32.5Hz, 32.5Hz であった。条件 I は、他の場合と比較して磁気ばねが非常に硬い状態に対応し、さらに、磁石間距離 X_3 [mm] が小さい条件である。この条件下での攪拌フィンの振幅が最も大きいことが確認できる。これは、励振用磁石間距離 B_3-C_1 (B_3-C_2) がもっとも近接しているため、大きな加振力が攪拌フィンに作用したためと考えられる。各条件下で 30~35Hz で発生する主共振以外に、10~15Hz の周波数域に共振が確認できる。これは高調波共振が発生していると考えられる。

図 11 は、攪拌槽内に水を満たした状態での攪拌フィンの p-p 振幅の周波数応答である。この場合の実験も表 2 に示した条件 I, II, III のもとで実施した。条件 I の場合の共振周波数は 19Hz であり、そのときの p-p 振幅値は 1.94mm である。攪拌槽が空の状態と比較して、攪拌フィン周辺の液体による減衰効果が顕著に表れて、共振周波数、振動振幅ともになんかなり小さくなっている。混合すべき液体によって異なるものの、実際に使用されている振動型ミキサーにおいては、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が 6mm 以上の場合には十分な攪拌・混合を実現できている。しかしながら、本研究で試作したミキサーでは、共振周波数は一応の目標(15Hz 以上での共振)は達成できたものの、振動振幅がかなり小さいという結果であった。このため攪拌フィンに作用する加振力の増加をはかるなど、今後更なる改良が必要である。

本ミキサーの攪拌フィンの振動系は磁気ばねによる強非線形ばね特性を有し、攪拌フィン周辺の液体による高減衰力が作用する系である。さらに、液体中を複数の攪拌プレートが高速で往復運動を行うという極めて複雑な系である。今後、詳細な実験と解析が必要であり、この振動系の特性の全容を解明していく計画である。

6. 結論

本研究では、既報^{5),6)}で製作した振動型ミキサーに対し、攪拌フィンの磁気浮上方法、加振方法の改良を行った。また、3枚の円板状の攪拌プレートをもつ攪拌ユニットを製作し、このユニットを3個直列に結合した攪拌部をもつ振動型ミキサーを製作した。加振部は円板内に永久磁石を2個設置し、その円板を回転させることにより、周期的に変動する磁気力を攪拌フィンに作用させるシンプルな機構とした。この加振方法の採用により、攪拌フィンには強い加振力を作用させることができた。一方、加振部の運動は、基礎部や装置フレーム部などミキサー全体の有害な振動の原因となるが、本研究で採用した加振機構は、この振動の発生を防止することができる。

攪拌槽内を空の状態と液体(水)で満たした状態のそれぞれについて、磁石間距離を変更して攪拌フィンを励振させた場合の攪拌フィンの振幅周波数応答を確認した。攪拌槽内を水で満たした状態では、攪拌フィンは 19Hz で共振を発生し、そのときの p-p 振幅は 1.94mm という結果であった。この攪拌フィンの p-p 振幅の大きさは、目標値 6mm に対し、不十分な結果であった。今後、攪拌フィンの磁気浮上機構や励振機構の変更などを行い、より大振幅かつ高周波数域で振動するよう振動型ミキサーを改良する必要がある。

終わりに、本研究は、平成 25 年度科学研究費補助金基盤研究(C)の援助を受けたことを付記し、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 小川 浩平, 斉藤 文良, 佐藤 一省, 平田 雄志編: 攪拌・混合技術, アイピーシー, 1988.
- 2) 高橋 幸司: 液体混合の最適設計と操作, テクノシステム, 2012.
- 3) T. Taniguchi : Mixing apparatus, U. S. Patent 5, 178,461, 1993.
- 4) 大村 直人, 小村 崇信ほか 4 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, pp. 1-6, 2004.
- 5) 日高 淳一, 岡部 匡, 濱畑 貴之: 磁気浮上型攪拌フィンを用いた振動型混合装置の開発(攪拌フィンの共振振動数上昇のための混合装置の改良) 宮崎大学工学部紀要, 第 42 号, pp. 177-182, 2013.
- 6) 岡部 匡, 竹下 浩史, 濱畑 貴之, 他 2 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講演論文集, No. 138-3, pp. 231-232, 2013.
- 7) 田村 英之, 徐 志祥: 磁気ばね力関数同定の計算プログラム, 日本機械学会論文集(C編), 第 58 巻 546 号, pp. 635-642, 1992.