

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)

日高 淳一^{a)}・岡部 匡^{b)}・濱畑 貴之^{c)}

Development of Vibration Mixer Using Magnetically Levitated Impeller (Improvement of Mixer for Increasing Resonance Frequency of Vibration Impeller)

Junichi HITAKA, Tadashi OKABE, Takayuki HAMAHATA

Abstract

In order to improve the efficiency in agitation process, the mixer using a vibration impeller with reciprocating motion in cylinder vessel is developed. This impeller is levitated by repelling force of permanent magnet executes vibrating motion. In order to increase the resonance frequency of the vibration impeller, new type of the vibration impeller are developed, and the magnetic levitation system of the mixer is improved by using waterproofed Neodymium magnets. The analytical model of the vibration impeller becomes the nonlinear oscillator because the magnetically repulsive force has strong non-linearity. The equation of motion of the impeller with non-dimensional form is derived to analyze the motion of the vibration impeller. Experimental devices on a trial basis are manufactured. In order to investigate the characteristics of motion of the vibration impeller, some experiments are performed. The frequency responses of amplitude of the vibration impeller are shown. When the vibration impeller is excited in a container with water, the resonance frequency of the vibration impeller of the developed mixer can be in excess of 15.5Hz. The peak-to-peak amplitude of the vibration impeller is 3.4mm at the resonance frequency.

Keywords: Nonlinear vibration, Forced vibration, Vibratory mixer, Vibration impeller, magnetically levitated Impeller

1. はじめに

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資生産プロセスにおける重要な基本単位操作の一つとして、攪拌・混合プロセスがある。近年、特にこれら攪拌・混合プロセスに対して高速化、高精度化、分散粒子の高均一化が要求されている。現在利用されている多くの攪拌・混合装置は攪拌槽内を回転翼で攪拌するタイプが主流である^{1,2)}。しかしながら、この回転翼型の攪拌・混合装置は、装置規模が大きくなるため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や混合過程での不純物の混入などの問題点がある。

回転翼型攪拌・混合装置の問題点を解決したのとして、振動型混合装置^{3,4)}がある。この振動型混合装置とは、攪拌槽内で攪拌フィンを上下に往復運動させることにより、物質の攪拌・混合を連続的に行うものである。しかしながら、従来の振動型混合装置は攪拌フィンとその駆動機構が

シャフトにより直結しているため、摺動部からの液漏れを防ぐために厳重なシールが必要となる。そのシールによる動力損失、摺動部から攪拌槽内への不純物の混入など装置の高性能化をはかるうえで解決すべき問題点がある。

振動型混合装置における問題点を解決するために、著者らは、磁気浮上型攪拌フィンを用いた振動型混合装置を提案した⁵⁾。この装置は磁気反発力によって攪拌フィンを攪拌槽内に浮上させ、攪拌槽外部からの周期変動磁力によって、この攪拌フィンを励振するものである。この攪拌フィン駆動方式の採用により、従来の振動型混合装置では不可能だった攪拌槽と外部環境との分離を実現でき、攪拌・混合プロセスにおける不純物混入の問題を解決することが可能となった。この振動型混合装置の攪拌フィンは、磁気反発ばねにより構成される振動系の非線形共振を利用して、攪拌フィンを大きな振幅でかつ高振動数で振動させるものである。磁気浮上用磁石の磁石間距離などの振動系のパラメータを変化させることで磁気反発力を調整できるため、攪拌フィンの共振振動数を変化させることが容易である。

本研究では、攪拌フィンの共振周波数の上昇を目的として、前報⁶⁾で提案した振動型混合装置の改良を行った。主

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

な改良点は、磁気浮上用磁石に防水加工を施したネオジウム磁石の採用であり、攪拌フィンの軽量化及び攪拌槽の小型化を実現することができた。実際に試作機を設計・製作し、攪拌槽内を水で満たしたときの攪拌フィンの強制振動の振動特性を実験により明らかにした。さらに、攪拌フィンの振動特性の解明のために、磁気ばね関数の数学モデルを作成し、攪拌フィンの運動方程式の導出を行った。

2. 振動型混合装置の概要

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。また、攪拌槽部の詳細図と磁気浮上用攪拌フィンをそれぞれ図2、図3に示す。本振動型混合装置は、攪拌槽内で磁気反発力により浮上した攪拌フィンに対し、周期変動する磁気力を作用させ、攪拌フィンを励振し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攪拌槽内流体への不純物の混入を防ぐことが可能となる。

攪拌槽は、内径 48mm 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、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 部のユニットが実際に混合を行う部位である。P2 部ユニットは、その上部に同型のユニットを直列に積層して追加設置することが可能である。P2 部のユニットを追加していくことにより、融解が非常に困難な物質の混合・攪拌にも対応することが可能となる。なお、本研究では、P2 部の1ユニットのみで基礎実験を実施した。攪拌フィンは4か所に穴をあけた円形段付きプレート3枚で構成されている。攪拌フィンの両端に永久磁石 B, B' を取り付け、それらを挟み込むように C, C' を攪拌槽に取り付ける。この永久磁石 B と C、永久磁石 B' と C' は同極を対向させて配置させ、攪拌フィンを相互の反発力で挟み込むことで攪拌槽内で攪拌フィンを浮上させる。永久磁石 BC 間、B'C' 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調整できる構造とした。攪拌フィンの下端に設置した永久磁石 D は、攪拌槽外部に設置した永久磁石 A の往復運動により励振される。駆動モーターの回転運動は、スライダ・クランク機構を用いて外部永久磁石 A の往復運動に変換される。永久磁石 AD 間の反発力が周期変動することで攪拌フィンは励振される。永久磁石 B, B', D と攪拌フィンは樹脂パイプによって連結され一体となって運動する。

攪拌槽内の液体の運動が確認できるように、攪拌槽には亚克力パイプを使用した。攪拌槽 P1 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 P3 部の排出口から混合液を排出する。亚克力パイプ、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にシールを行った。永久磁石 C, C' の磁石保持器内には O リングを仕様し、内部の磁石 C, C'

を濡らさないようにした。本装置で使用する磁石は、すべてネオジウム磁石とした。特に、攪拌槽内で使われている永久磁石 B, B', D には、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した。この磁石の採用により、磁石を直接水に浸すことが可能となり、攪拌フィンの外径を小さくすることができ、攪拌フィンの質量の大幅な軽量化を実現することができた。また、図3に示すように、磁気浮上攪拌フィンの磁石カバーや攪拌フィンの締結には樹脂パイプに直接ねじ切りを利用することで軽量化をはかった。その結果、攪拌フィン振動系の固有振動数を上昇させることができた。本年度の混合装置で使用した磁石の仕様を表1に示す。

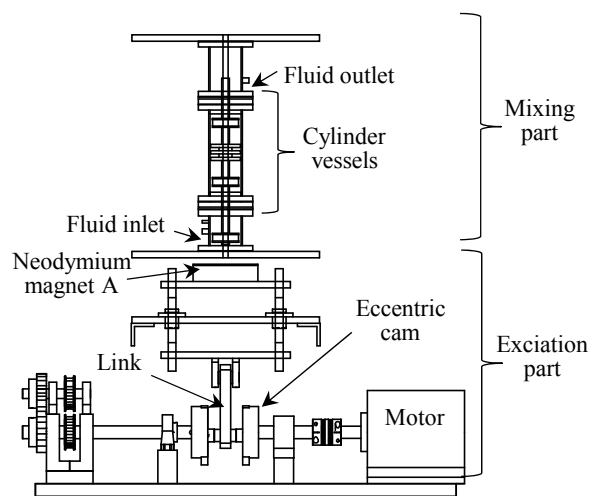


図1. 振動型混合装置の全体図。

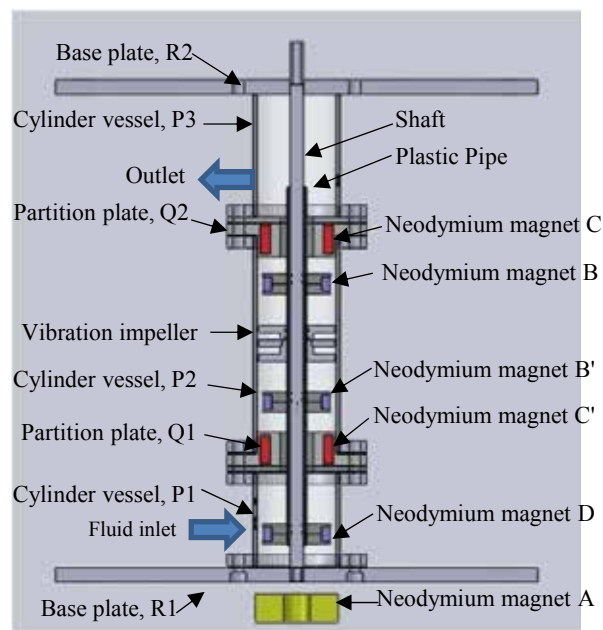


図2. 攪拌部の詳細図。

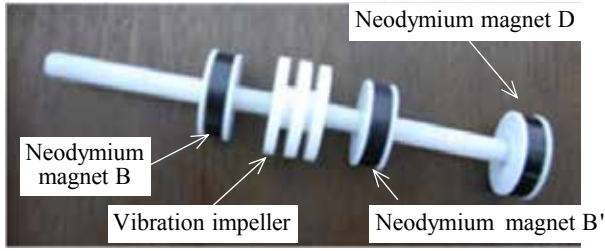


図 3. 磁気浮上攪拌フィン.

表 1 磁石の仕様.

Neodymium magnet	Size	Adsorptive Power	Surface treatment
A*	φ50×φ16×10 mm	33N	
B, B', D	φ40×φ30×10 mm	19.9N	Waterproofing
C, C'	φ44×φ32×20 mm	35N	

※永久磁石 A は厚さ 10[mm]の磁石を 2 枚重ねて使用した。

表 2 磁気ばね関数同定のパラメータ.

Parameter	Pair of Neodymium magnet	
	B and C ($i=1$)	A and D ($i=2$)
b_i	6.131×10^{-3}	1.012×10^{-2}
c_i [N]	4.841×10^{-2}	-4.862×10^{-1}
e_i	4.562×10^{-3}	1.402×10^{-2}

3. 磁気反発力測定

攪拌フィン部が構成する振動系の運動方程式を作成するために、磁気反発力のばね関数の近似式を作成した。

磁気反発力実験装置の概略図を図 4 に示す。永久磁石 B, C を同極が対向するようにプレートに固定する。永久磁石 C を固定したプレートをロードセル [(株)共和電業 LM-2KA-P] と接するように設置し、永久磁石 B を限りなく近づけた状態から徐々に離していきその時の磁石間距離と反発力を測定する。測定した反発力は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] に入力後、PC でデータを処理した。

本研究の混合装置で使用する磁石対 (B, C) と前報の混合装置で使用する磁石対の磁気反発力の測定結果の比較を図 5 に示す。図 5 において、横軸は磁石間距離 x [m]、縦軸は反発力 $F(x)$ [N] である。昨年度使用した磁石の反発力に比べ、磁石 B, C 間の反発力は大きくなっていることが確認できる。

磁気ばねモデルの関数として次式を用いた⁷⁾。

$$F(x) = a_i \left(\frac{d_i}{x + b_i} \right)^p + c_i \quad (1)$$

ここで、式(1)中の下付添え字は、 $i=1$ は磁石 B, C 間、 $i=2$ は磁石 A, D 間の反発力の近似した場合を示す。式(1)を単純化するために次の変数 e_i を導入する。

$$e_i = a_i d_i^p \quad (2)$$

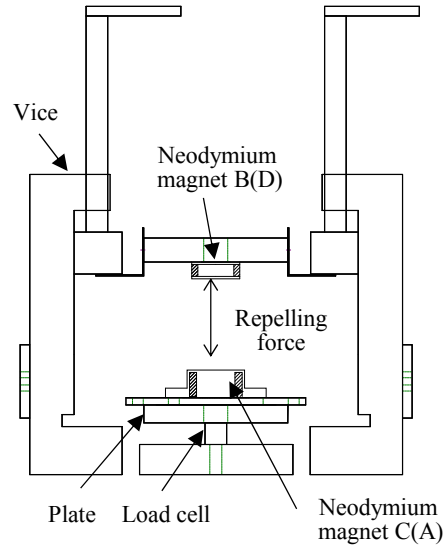


図 4. 磁気反発実験装置の概略図.

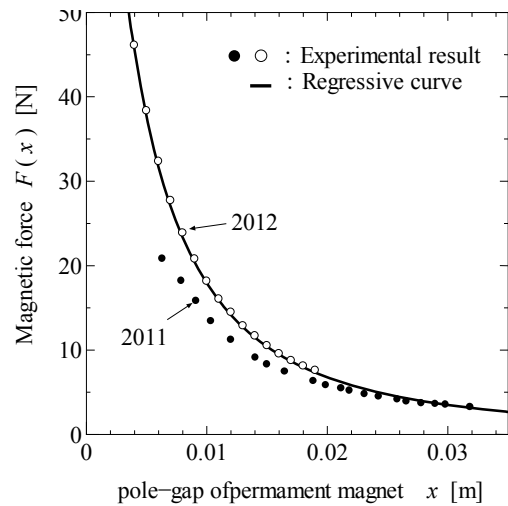


図 5. 磁気反発力実験結果(永久磁石 B, C 間).

磁気反発力実験で得られた測定データを式(1)で近似するため、同式中の定数 a, b, c, d を誤差の最小二乗法により磁気ばね関数を求める。最も rms 誤差が小さくなり、実際の磁気反発力を精度良く近似できる $p=2$ とした場合の b, c, e を求める。この時、磁石間距離 x_j 、磁石間の反発力 y_j と置いた時の絶対誤差の二乗和は次式となる。

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^N \left(y_j - \frac{e_i}{(x_j + b_i)^2} - c_i \right)^2 \quad (3)$$

定数 b_i に関する ε_i の停留条件 $\partial \varepsilon_i / \partial b_i = 0$ 、定数 c_i に関する ε_i の停留条件 $\partial \varepsilon_i / \partial c_i = 0$ 、定数 e_i に関する ε_i の停留条件 $\partial \varepsilon_i / \partial e_i = 0$ として連立方程式を解き、この方程式をニュートン法を用いて解くと、定数 b_i, c_i, e_i が決定できる。以上の計算によって求められたそれぞれの磁気ばね関数のパラメータを表 2 に示す。図 5 には式(1)の近似式を用いた磁気ばね関数の同定結果を示す。図 5 から実験結果は理論値とほぼ一致していることが確認できる。本研究で使用する他の磁石対 A, D 間の磁気反発

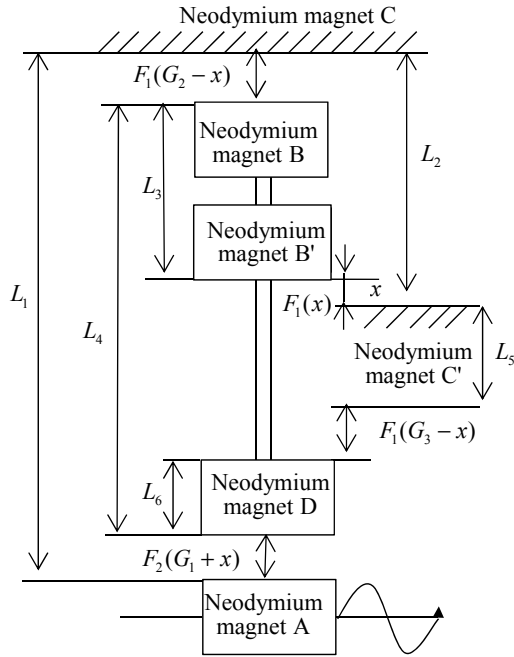


図 6. 攪拌フィン振動系の解析モデル.

力についても、同様の方法で近似式を作成した。

4. 攪拌フィンの運動方程式

攪拌フィンの解析モデルを図 6 に示す。中心軸に沿って鉛直方向のみ運動可能な磁気浮上攪拌フィンを、質量 m [kg] の浮上体とする。攪拌フィンは磁気反発を調整するために永久磁石 B, C, 永久磁石 B', C' 及び永久磁石 A, D を取り付けている。永久磁石 C' の上面と攪拌フィン中央部にある永久磁石 B' の下面までの浮上距離を x [m]、スライダ・クランク機構による基礎部の強制変位を $S(\omega t)$ 、基礎の強制角振動数を ω [rad/s]、時間を t [s] とする。強制変位 $S(\omega t) = 0, (\omega t = \pi/2)$ のときの永久磁石 A の上面と永久磁石 C の下面までの距離、永久磁石 C の下面と永久磁石 C' の上面の距離、永久磁石 B の上面と永久磁石 B' の下面までの距離、永久磁石 B の上面と永久磁石 D の下面までの距離をそれぞれ L_1 [m], L_2 [m], L_3 [m], L_4 [m] とする。また、永久磁石 C' の厚みと永久磁石 D の厚みをそれぞれ L_5 [m], L_6 [m] とする。

図 6 に示すように、磁気ばね関数を $F_i(x), (i=1,2)$ とし、系の粘性減衰係数を c [Ns/m] とすると、攪拌フィン部の運動方程式は、次式となる。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + mg - F_1(x) - F_2(G_1 + x) + F_3(G_2 - x) + F_1(G_3 - x) + m\ddot{S}(\omega t) = 0 \quad (4)$$

ここで、変数 $G_j (j=1,2,3)$ は次式で定義される。

$$G_1 = L_1 - S(\omega t) - L_4 - L_2 + L_3 \quad (5)$$

$$G_2 = L_2 - L_3 \quad (6)$$

$$G_3 = L_4 - L_3 - L_5 - L_6 \quad (7)$$

磁気ばね関数 $F_i(x), (i=1,2)$ は、前節の結果から次式のように表される⁷⁾。

$$F_i(x) = \frac{e_i}{(x + b_i)^2} + c_i \quad (8)$$

永久磁石 A の往復運動変位は、次式で表される。

$$S(\omega t) = a \left\{ 1 - \cos \omega t + \frac{b}{a} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2 \sin^2 \omega t} \right] \right\} \quad (9)$$

ここで、永久磁石 A の加振変位振幅を a [mm]、スライダ・クランク機構のコンロッドの長さを b [m] とする。以上より、運動方程式は次式となる。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + mg - \frac{e_1}{(x + b_1)^2} - \frac{e_2}{(x + G_1 + b_2)^2} + \frac{e_1}{(-x + G_2 + b_1)^2} + \frac{e_1}{(-x + G_3 + b_1)^2} - c_1 + c_2 + m\ddot{S}(\omega t) = 0 \quad (10)$$

式(10)において浮上体が空間に静止するのは、重力と攪拌フィンに作用する磁気反発力がつりあう位置である。その時の永久磁石 C' の上面と永久磁石 B' の下面の間の相対変位を x とする。加振振幅 $S(\omega t) = 0$ であるので、平衡位置は、式(10)に磁気反発力実験で得られたパラメータ値 b_i, c_i, e_i を代入し、ニュートン法を用いて数値的に求めることができる。得られた平衡位置を l とし、平衡位置での線形化固有角振動数 ω_n と固有振動数 f_n は次のように求められる。

$$\omega_n^2 = \frac{2}{m} \left[\frac{e_1}{(l + b_1)^3} + \frac{e_2}{(l + G_1 + b_2)^3} + \frac{e_1}{(-l + G_2 + b_1)^3} + \frac{e_1}{(-l + G_3 + b_1)^3} \right] \quad (11)$$

$$f_n = \omega_n / 2\pi \quad (12)$$

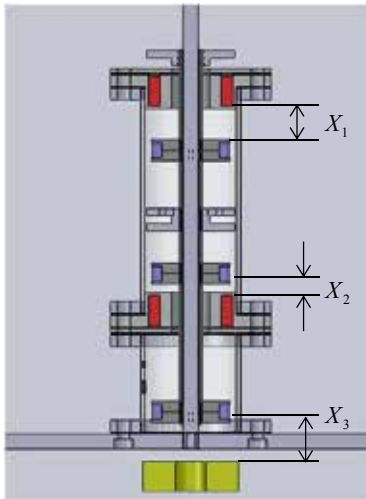
式(11), (12)より、解析モデルによって求められた攪拌槽が空の状態の平衡位置での固有振動数の解析値とその時の磁石間距離のパラメータ L_3, L_4, l の値を表 3 に示す。なお、距離 L_1, L_2 は、それぞれ 245 [mm], 126 [mm] であり、永久磁石 C' の厚み L_5 は 20 [mm]、永久磁石 D の厚み L_6 は 10 [mm]、攪拌フィンの質量は 0.211 [kg] である。

表 3 磁石間距離のパラメータと計算値.

L_3 [mm]	L_4 [mm]	l [mm]	f_n [Hz]
112	198	7.48	32.4
106.5	200	10.7	25.4
105	197	11.5	23.7
98	197	15.9	19.1

表 4 磁石間距離のパラメータ(実験時).

Condition	X_1 [mm]	X_2 [mm]	X_3 [mm]
C-1 (△)	7	7	40
C-2 (○)	9	10.5	36
C-3 (□)	10	11	38
C-4 (●)	13	15	35


 図 7. 磁石間距離 X_1, X_2, X_3 の定義.

5. 実験結果

実験は加振部の振動数を変化させて攪拌フィンの p-p 振幅を測定した。攪拌フィンの変位の計測には、ロングレンジタイプのレーザー変位計[(株)キーエンス LK-500]を用いた。攪拌フィンと一体となって運動する樹脂パイプ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。実験は磁石間距離 X_1, X_2, X_3 の条件を変更し、数回実験を行った。各磁石間距離を表 4 に、各磁石間距離 X_1, X_2, X_3 の定義を図 7 に示した。実験は、攪拌槽内に水を流さない空の状態と、攪拌槽内に水を充填させた状態の 2 パターンで行い、各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。加振周波数 f は 5[Hz] から 1[Hz] 刻みで増加させ、共振点付近では 0.5[Hz] 刻みで増加させて実験を行った。加振振幅 a (永久磁石 A の振幅) は 10[mm] とした。

攪拌槽内が空の状態にした時の攪拌フィンの振幅の周波数応答曲線を図 8 に示す。横軸は永久磁石 A の振動数 f [Hz]、縦軸が攪拌フィンの p-p 振幅 X_p [mm] である。攪拌槽内が空の時の攪拌フィンの振幅の周波数応答曲線を表 4 に示す 4 つの条件下で比較した。C-2, C-3 の時の共振周波数はそれぞれ 29.5[Hz], 26.5[Hz] であり、これらの周波数より加振周波数を上昇させた場合、非線形振動固有の現象である跳躍現象が発生することを確認できる。

図 9 には、C-2 のときの跳躍現象発生時の振動波形を示

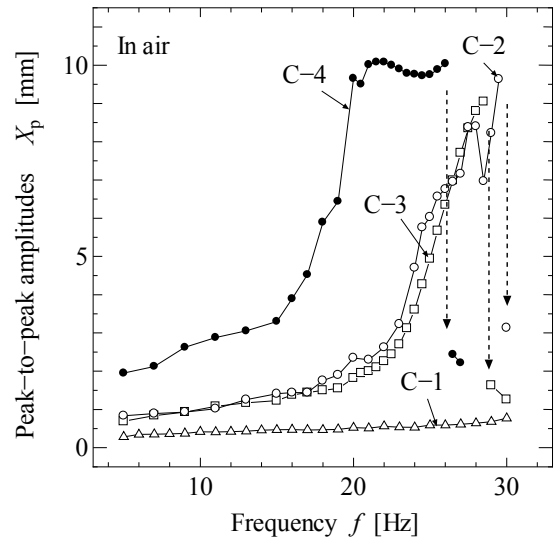


図 8. 空気中における攪拌フィン振幅周波数応答曲線.

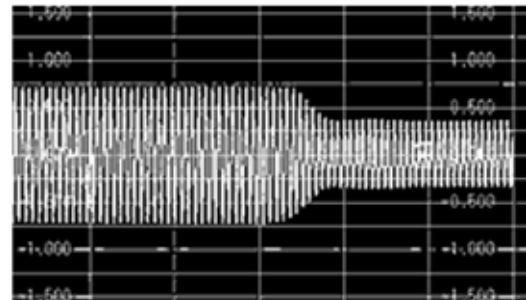


図 9. 跳躍現象発生時の振動波形.

した。また、C-2 の条件下では、22~26.5[Hz] の振動数領域で 10[mm] のほぼ一定の振幅となっているが、これは攪拌フィンが攪拌槽の上部壁に衝突が発生しているためである。C-1 の条件は、他の場合と比較して磁気ばねが非常に硬い状態に対応する。この C-1 時の共振振動数は測定できていないが、30[Hz] 以上の高い固有振動数を持つと推測される。図示の観測値は、主共振右すそ部の周波数応答振幅であると考えられる。図 8 に示した振幅の周波数応答特性から、攪拌フィン振動系は漸硬型の強い非線形特性をもつことが確認された。以上の結果から磁石間距離 X_1, X_2 が小さいほど固有振動数が大きくなることが確認できた。

図 10 には、攪拌槽内に水を充填させた時の攪拌フィンの振幅の周波数応答曲線を示した。この場合の実験も表 4 に示した C-1~C-4 の条件で実施した。C-2 の場合の共振振動数は 15.5[Hz] であり、そのときの p-p 振幅値は 3.36[mm] である。攪拌槽を空にした場合と比較して、攪拌フィン周辺の流体による減衰効果が顕著に表れて、共振振動数は小さくなっているが、15[Hz] 以上で攪拌フィンの共振を発生させることができた。現在、実際に使用されている既存の振動型攪拌装置においては、使用される作動流体

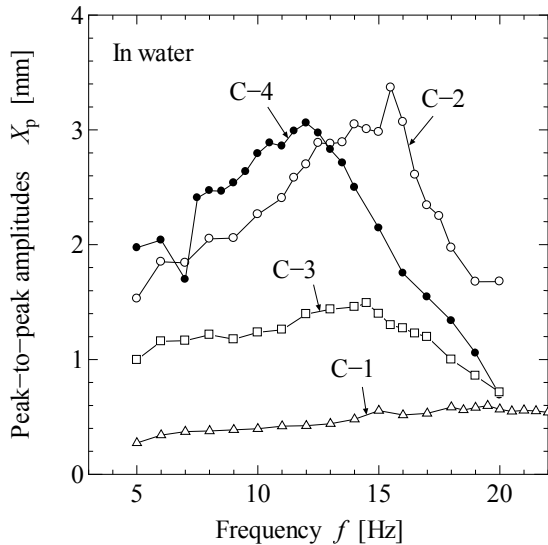


図 10. 水中における攪拌フィン振幅周波数応答曲線.

によって異なるものの、ほぼ 15[Hz]で十分な攪拌を実現できていることから、本研究で試作した混合装置は一応の目標を達成できたと考える。ただし、攪拌フィンの振動振幅の不足など多くの課題があり、今後更なる改良が必要である。

6. 結論

本研究では、前報⁶⁾で製作した振動型混合装置に対し、攪拌フィンの磁気浮上システムの改良を行った。磁気浮上フィンに組み込まれる磁石に、特殊表面加工を施した防水仕様のネオジム磁石を採用したことにより、攪拌フィンの質量を大幅に軽量化することができた。これにより、攪拌フィンの固有振動数を大幅に上昇させることができた。

攪拌槽内を空とした場合の攪拌フィンの強制振動実験では、非線形振動固有の現象である跳躍現象が発生するこ

とが確認できた。また、この場合の振幅周波数応答曲線の特性から、攪拌フィン振動系は、漸硬型の非線形ばね特性を有することが実験的に確認できた。攪拌槽内を流体(水)で満たし、攪拌フィンを強制励振させた場合の攪拌フィンの振幅周波数応答を実験的に確認した。この場合、攪拌フィンは、15.5[Hz]で共振を発生し、そのときのp-p振幅は3.36[mm]であった。本研究で試作した混合装置は、前報で試作した混合装置と比較して、より高振動数域で攪拌フィンを振動させることが可能となった。今後、攪拌フィンの励振機構をさらに検討し、より大振幅かつ高振動数域で振動させるよう改良を行っていく計画である。

終わりに、本研究は、平成24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)小川浩平, 齊藤文良, 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)寺内克行, 岡部匡ほか2名: 磁気浮上型フィンを利用した振動型混合装置の開発, 日本機械学会九州支部第61期総会・講演会講演論文集, No. 088-01, pp. 203-204, 2008.
- 6)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, 第40号, pp. 187-192, 2011.
- 7)田村英之, 徐志祥, 松永淳一: 磁気ばね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巻第546号, pp. 635-642, 1992.