

電磁力加振方式を採用した磁気浮上型攪拌翼を有する 振動型ミキサーの開発

白山 智洋^{a)}・岡部 匡^{b)}・濱畑 貴之^{c)}・池田 尚史^{a)}・加藤 準人^{a)}

Development of Vibratory Mixer Using Magnetically Levitated Fin Excited by Electromagnetic Force

Tomohiro USUYAMA, Tadashi OKABE, Takayuki HAMAHATA,
Naofumi IKEDA, Hayato KATO

Abstract

In order to improve the efficiency of mixing process, the vibratory mixer using magnetically levitated fin is developed. The stirring fin of this mixer is levitated with the magnetic force enhanced by Halbach array in stirring vessel, and excited from outside stirring vessel by periodically changing electromagnetic field. The electromagnetic field is generated by a coil installed outside the stirring vessel. By adopting this exciting system, mixed liquid in the stirring vessel 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 vessel is filled with water. Frequency response of peak-to-peak (p-p) 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 12.9Hz and p-p amplitude of the stirring fin is 7.50mm. 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

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、種々の物質生産において、物質の攪拌・混合工程に対して高速化、高精度化、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、攪拌槽内を回転する攪拌翼で混合・攪拌するタイプのものが主流である。しかし、この混合方法は混合効率が悪く、バッチ処理であるため連続的な処理が不可能である。さらに、粉液混合の場合にはダマ（粉体の未溶解固形物）の生成による不良品の発生などの問題を抱えている。回転翼型の混合装置においては、攪拌翼の形状が液体の混合効率に大きな影響を及ぼし^{1,2)}、混合効率を改善するために様々な種類の攪拌翼が開発されている。低粘度液体用攪拌翼としてはプロペラ翼、ディスクタービン翼、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使用されている。しかし、根本的な問題解決には至っていないのが現状である。

一方、均一な混合が得られるという振動式混合、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^{3,4)}。この振動型ミキサーは、円筒状攪拌槽内で、螺旋状の攪拌エレメントを振動させ、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。

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ことを目的とする。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電磁加振する。そのため、攪拌槽内部の液体や粉体を周囲環境から完全に分離し混合処理を行うことができ、従来の機械駆動式振動型混合装置が持つ混合液への不純物混入などの問題を克服することができる。本研究では、既報⁵⁾で製作された混合装置をベースに攪拌翼の磁気浮上機構の再検討を行い、攪拌翼の磁気浮上に用いる磁石の配置にハルバッハ配列を採用した。本論文では、製作した振動型混合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振動特性について報告する。

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職員

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と概略図をそれぞれ図1、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)から構成される。本混合装置では、攪拌槽内で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に対し、攪拌槽外部に設置したコイルによって発生する交流磁場を利用して加振する。この攪拌翼の往復運動を利用して液体と液体、あるいは液体と粉体の混合処理を行う。

2.2 攪拌槽

本混合装置の攪拌槽は、内径44mm、高さ160mmの円筒型攪拌槽(アクリル製)である。攪拌翼はこの中を上下方向に往復運動する。図3に、本研究で使用した攪拌翼を示す。この攪拌翼は、攪拌プレート、中空シャフト、永久磁石(ネオジウム磁石)により構成される。図4に示す攪拌プレートは、外径40mm、板厚2mmの円形型であり、その中心には中空シャフトに固定するためにM16のねじ穴を設けている。この攪拌プレートには、その半径30mmの位置に、4個の液体通過用孔(直径8mm)を設けている。本装置には、この攪拌翼を4枚設置している。攪拌翼の中央部には、励振用の永久磁石として外径40mm×内径30mm×高さ16mmの磁石 $E_n(n=1, 2)$ が設置されている。また、攪拌翼の両端部には、磁気浮上用の永久磁石が固定されている。攪拌槽上部の磁気浮上には、受動型磁気軸受⁹⁾を参考にした磁石配置を採用した。攪拌翼上部に固定する磁気浮上用磁石のベースは、外径30mm×内径25mm×高さ9mmの永久磁石 $a_n(n=1, 2)$ であり、これを2個結合させて1つの磁石としたもの(磁石Aと呼ぶ)を設置した。この磁石Aを囲むようにして、外径50mm×内径38mm×高さ30mmの永久磁石Bを設置し、磁石対A-B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。また、図5に攪拌翼下部に固定する磁気浮上用の永久磁石 $C_n(n=1\sim 16)$ を示す。長さ20mm×幅5mm×高さ5mmの角型の磁石 C_n を水平面から45°傾けた状態で、放射状に等間隔で16個設置する。同様に、長さ40mm×幅5mm×高さ5mmの角型の永久磁石 $D_n(n=1\sim 16)$ を放射状に16個設置する。図6に磁石 D_n の配置の様子を示す。これらの磁石 C_n, D_n を図7に示すように配置する。本装置では、図7に示すように磁石 C_n, D_n を配置することにより、攪拌翼に鉛直方向だけでなく水平方向に磁気力を作用させ、完全非接触での攪拌翼の磁気浮上を試みた。また、磁石 C_n, D_n は図8に示す磁化方向で配列している。このような配列をハルパッハ配列と言い、磁石 C_n, D_n の対向する面に磁界を集中させることができる。逆にその磁石の反対面では磁界が弱まる。本装置の攪拌翼は、この磁石 C_n-D_n 間と、前述の磁石対A-B間に働く磁気力によって攪拌槽内で磁気浮上している。表1に本混合装置に使用した磁石の仕

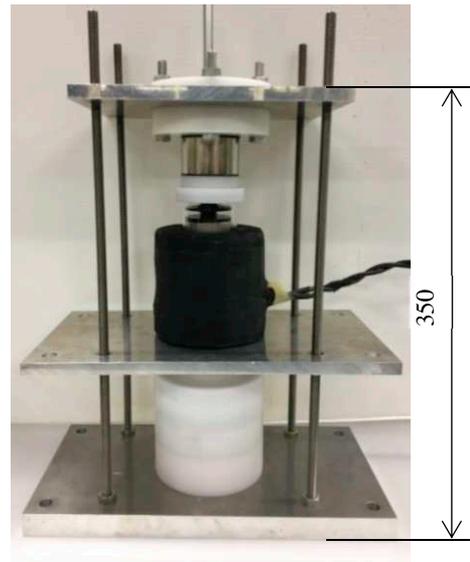


図1. 電磁加振式振動型混合装置の全体図.

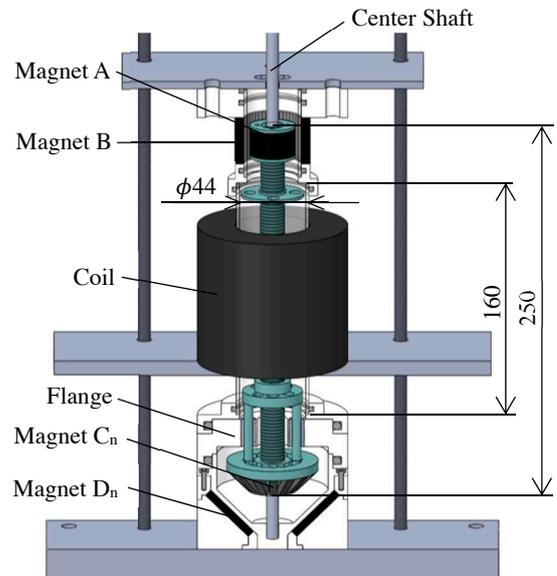


図2. 電磁加振式振動型混合装置の概略図.

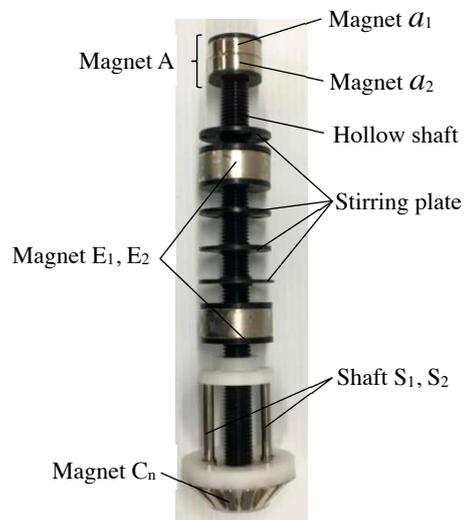


図3. 攪拌翼.

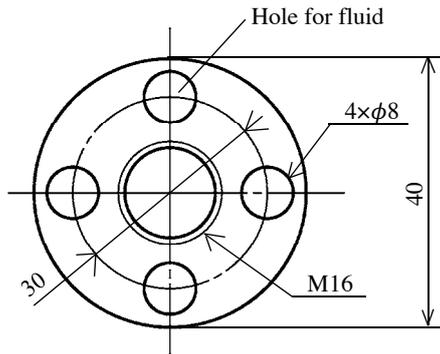


図4. 攪拌プレート.



図5. 永久磁石 C_n ($n=1\sim 16$).

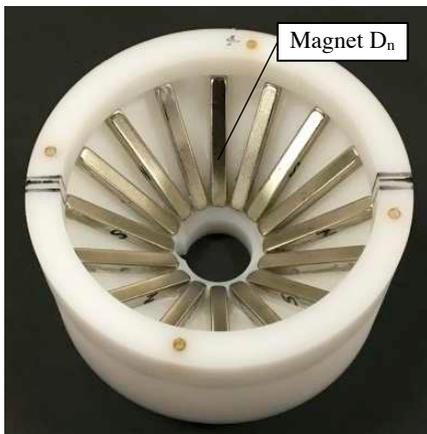


図6. 永久磁石 D_n ($n=1\sim 16$).

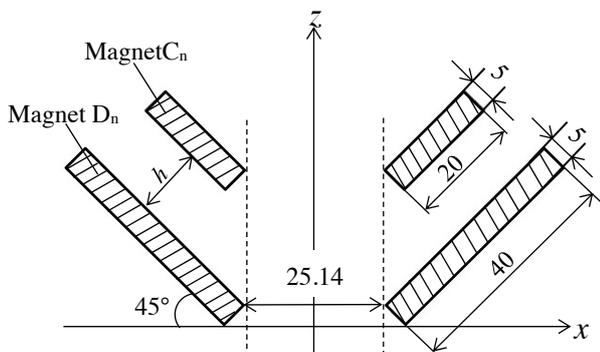


図7. 永久磁石 C_n, D_n の配置.

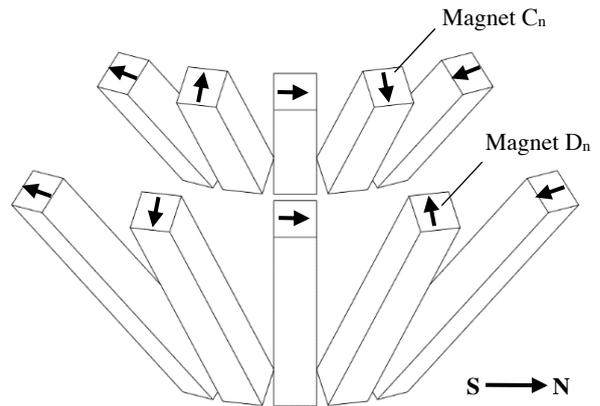


図8. 永久磁石 C_n, D_n の配置と磁化方向.

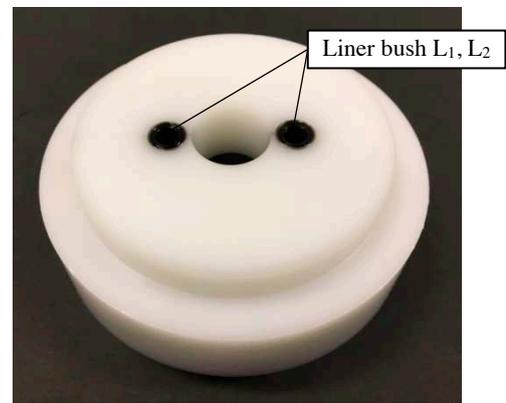


図9. フランジ.

表1. 永久磁石の仕様

Magnet	Size[mm]	Adsorptive power[N]	Grade
a_n ($n=1, 2$)	$\phi 30 \times \phi 25 \times 9$	90	N35
B	$\phi 50 \times \phi 38 \times 30$	381	N35
E_n ($n=1, 2$)	$\phi 40 \times \phi 30 \times 16$	260	N40
C_n ($n=1\sim 16$)	$20 \times 5 \times 5$	31	N40
D_n ($n=1\sim 16$)	$40 \times 5 \times 5$	66	N35

様を示す。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を実現できなかったため、その外周面にすべり軸受が設置された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。また、磁石 C_n - D_n 間には磁石 C_n と磁石 D_n の配列の組み合わせにより磁気反発力または吸着力が働くことが確認されている（第3章参照）。そのため、磁石 C_n - D_n 間に常に磁気反発力を働かせた上で攪拌翼を磁気浮上させるために、攪拌翼の下部に設置した直径6mmの2本のシャフト S_1, S_2 (図3参照) を、フランジ (図9参照) に取り付けられた2個のリニアブッシュ L_1, L_2 にそれぞれ挿入することにより、攪拌翼の回転運動を拘束している。



図 10. コイル.

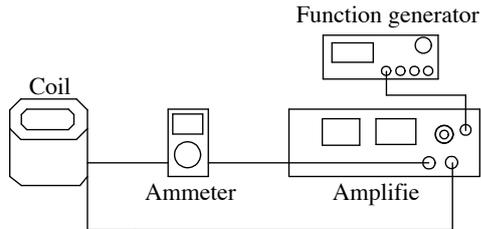


図 11. コイルの通電時に使用する機器.

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

2.3 攪拌翼加振用コイル

本研究で用いたコイルを図 10 に示す。また、その仕様を表 2 に示す。コイルの形状は内径 50mm、外径 100mm、長さ 90mm であり、総巻数は 644 巻きである。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°C で飽和するように設計されている。コイルは、外径 48mm の攪拌槽の外部に、その長さ方向が鉛直になるように設置されている。このコイルに交流電流を流して周期変動する交流磁場を発生させ、攪拌翼に取り付けた永久磁石 $E_n(n=1, 2)$ が電磁気力を受けることで攪拌翼が加振する。コイルの通電時に使用する機器配置を図 11 に示す。コイルに発生する交流磁場の周波数は、関数発生器（岩崎通信機、SG-4321）により設定した。この関数発生器から出力された電流をバイポーラ電源（高砂製作所、BWS40-7.5）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の電流計（日置電機、DT4282）によりコイルに流れる電流値を計測した。

3. 磁気力測定実験と磁気力の解析

3.1 磁気力測定実験の概要

本実験では、攪拌槽下部の磁気浮上用の磁石 C_n と磁石 D_n の間に働く磁気力を磁気反発力測定装置を用いて測定した。また、磁石 C_n - D_n 間の磁気力を有限要素法 3次元電磁界解析ソフトウェア（ミューテック、 μ -MF）を用いて解析し、実験結果と解析結果の比較を行った。



図 12. 磁気力測定実験装置の全体図.

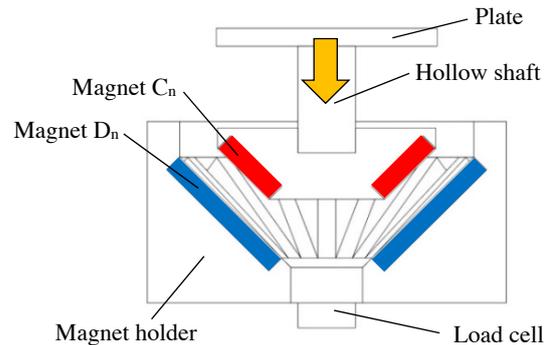


図 13. 磁気力測定実験装置の概略図.

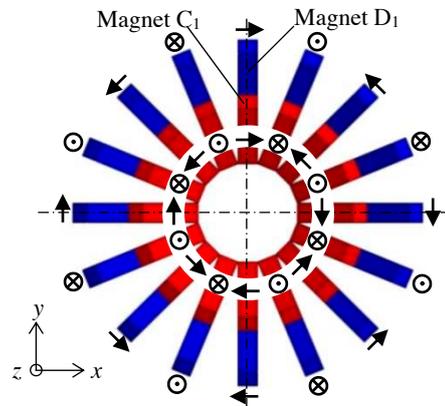


図 14. 永久磁石 C_n, D_n の磁化方向.

3.2 実験方法

磁気力測定実験装置の全体図と概略図をそれぞれ図12、図13に示す。図13に示すように、磁石 D_n を磁石保持器に固定し、その下にロードセル（共和電業、LM-2KA-P）を設置する。装置上部のプレートは、中空シャフト及び磁石 C_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磁石 C_n の位置（ C_n - D_n 間ギャップ）を変更させて、磁気反発力を測定した。実験は、図7に示すように磁石 C_n と磁石 D_n の距離を h [mm] とし、磁石 C_n を $h=10$ mm の位置から 0.5mm ずつ磁石 D_n に近づけていき、各位置における磁気力の測定を行った。この時、各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（共和電業、DPM-600）に入力後、PCでデータ処理を行った。なお、本実験における磁石 C_n, D_n の磁化方向（ハルバツハ配列）は図14に示す通りである。

3.3 実験結果および解析結果

図 15 に磁気力の実験結果と解析結果を示す。図 15 中の○が実験結果、●と◆が電磁界解析ソフトウェアによる解析結果である。横軸は磁石 C_n と磁石 D_n の距離 h [mm]、縦軸は 16 個の磁石 D_n (以後、磁石 D と呼ぶ) が 16 個の磁石 C_n (以後、磁石 C と呼ぶ) から受ける磁気力 P [N] を示している。なお、ハルバツハ配列と通常の配列 (磁石 C_n と D_n の同極を対向させた場合) による磁気力の比較を行うため、図 15 の●をハルバツハ配列を用いた解析結果 I、◆を通常の配列を用いた解析結果 II としてそれぞれ示す。図 15 の解析結果から、ハルバツハ配列は通常の配列に比べて非常に強い磁気力が作用することが分かる。例えば、 $h=5$ mm において磁石 D が受ける磁気力は、ハルバツハ配列の場合が約 92N、通常の配列の場合が約 14N であり、ハルバツハ配列を適用することにより、通常の配列よりも約 6.6 倍の強い磁気力が作用することが確認できる。次に解析結果と実験結果を比較すると、 $h=5$ mm において磁石 D が受ける磁気力の実験結果は約 70.4N であり、解析結果よりも 20N 以上低い値となった。これは、解析では磁石 D に働く磁気力の x, y 方向成分の合力は 0N であるが、実験装置の製作段階において磁石 C_n, D_n を組付誤差なしに等間隔に設置することは現実的に難しく、実験では磁気力の不均等により x, y 方向に力が逃げてしまったためであると考えられる。

また、図 14 に示すように、本研究では磁気浮上部に用いる永久磁石として各 16 個の永久磁石 C_n, D_n を用いたハルバツハ配列を採用している。この場合、ハルバツハ配列の特性から、磁石 D_n を固定して磁石 C_n を z 軸周りに 90° 回転させたとき、磁石 C_n の磁化方向は回転させる前の磁化方向と同一となる。そこで、図 14 に示す磁石 D_1 を固定し、磁石 C_1 を反時計周りに $\theta=0\sim 90^\circ$ まで 11.25° ずつ回転させたときに磁石 C_n-D_n 間に働く磁気力を電磁界解析ソフトウェアを用いて解析した。図 16 にその解析結果を示す。横軸は永久磁石 C_1 の回転角度 θ [deg]、縦軸は磁石 C と磁石 D が受ける磁気力 P [N] を示している。なお、図 16 において、図 14 に示す z 軸の正の向き (鉛直上向き) に働く力を正とする。攪拌翼側に設置される磁石 C に働く磁気力は、図 14 の磁石配置 ($\theta=0^\circ$) のとき最大で 40.8N (反発力) を示し、そこから $\theta=45^\circ$ まで減少する。そして $\theta=45^\circ$ のとき最小の -33.4N (吸着力) を示し、 $\theta=45\sim 90^\circ$ まで磁気力は上昇する。この解析結果から、磁石 C_n と磁石 D_n の配列の組み合わせにより、磁石 C_n-D_n 間には強い磁気反発力とともに吸着力も働くことが確認できる。本研究で使用する磁気浮上型攪拌翼は、永久磁石同士の磁気反発力を利用するため、磁石 C_n 、すなわち攪拌翼の回転を拘束した上で装置を稼働させている。

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 $3\sim 20$ Hz まで 0.2 Hz 刻み

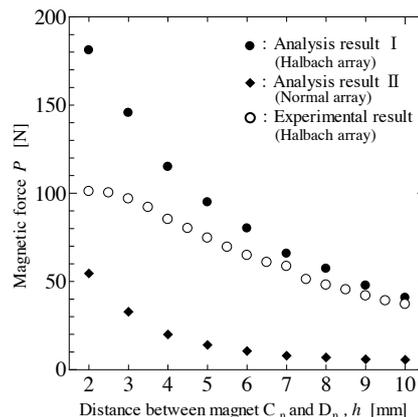


図 15. 永久磁石 D に働く磁気

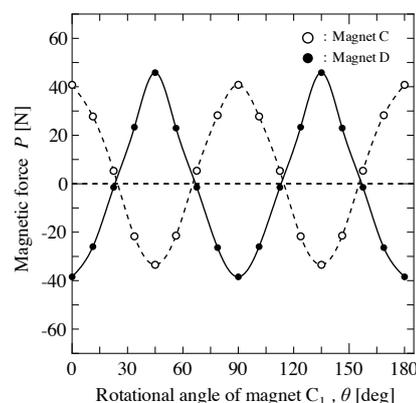


図 16. 永久磁石 C_1 の回転角度と磁気力。

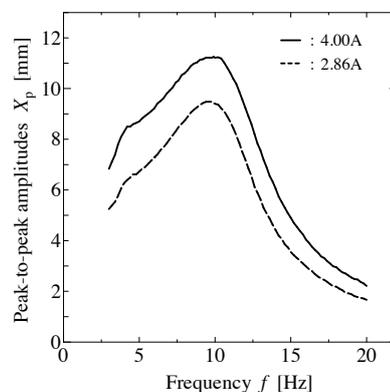


図 17. 攪拌翼の両振幅の周波数応答曲線 (実験条件 I)。

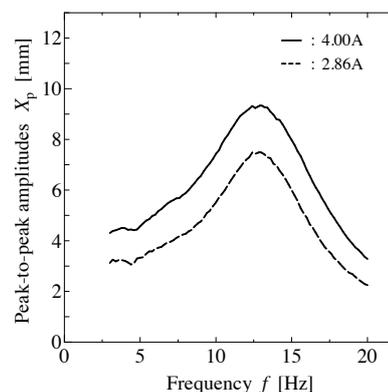


図 18. 攪拌翼の両振幅の周波数応答曲線 (実験条件 II)。

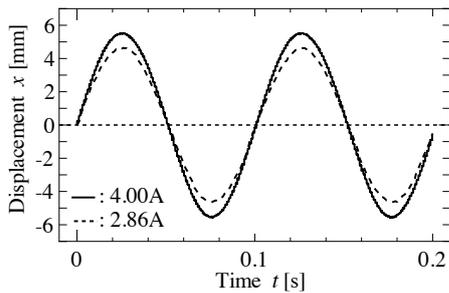


図 19. 攪拌翼の振動波形(実験条件 I、 $f=9.9\text{Hz}$).

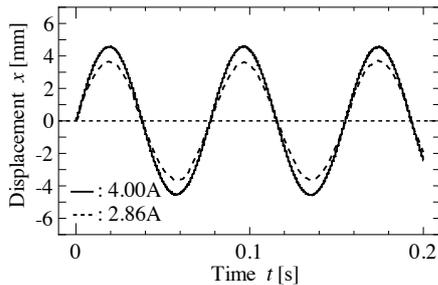


図 20. 攪拌翼の振動波形(実験条件 II、 $f=12.9\text{Hz}$).

(攪拌翼の共振点付近では 0.1Hz 刻み)で増加させた。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は $i=2.86\text{A}$ 、 4.00A (実効値)とした。攪拌翼の振幅は、レーザ変位計(キーエンス、LK-500)を用いて測定した。また、実験は図7に示す磁石 C_n と磁石 D_n の磁石間距離を $h=20\text{mm}$ としたときを実験条件 I、 $h=15\text{mm}$ としたときを実験条件 II として行った。

4.2 実験結果

図17に実験条件 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18は実験条件 II のものである。横軸は加振周波数 $f[\text{Hz}]$ 、縦軸は攪拌翼のp-p振幅 $X_p[\text{mm}]$ である。図17より条件 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 9.9Hz 、そのときの攪拌翼の振幅は 9.48mm であった。また、交流電流値が 4.00A の時は、共振周波数が 9.9Hz 、攪拌翼の振幅は 11.25mm であった。一方、図18に示す条件 II の場合、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 12.9Hz 、そのときの攪拌翼の振幅は 7.50mm であった。また、交流電流値が 4.00A の時は、共振周波数が 12.9Hz 、攪拌翼の振幅は 9.33mm であった。コイルに流す電流値を大きくすれば加振力が増加し、その結果、攪拌翼の振幅は大きくなる。また、条件 I と II の実験結果を比較すると、条件 II では条件 I に比べて攪拌翼に作用する磁気力が大きくなるため共振周波数は高くなるが、攪拌翼の振幅は小さくなる。図19、20には、条件 I と II の共振周

波数である 9.9Hz と 12.9Hz における攪拌翼の振動波形をそれぞれ示す。本混合装置における攪拌翼の固有振動数は、磁気浮上用の磁石 C_n - D_n 間の磁気ばねの硬さによって調整可能である。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。上記の攪拌翼の振動特性は、従来の機械駆動式振動型混合装置とほぼ同等のものである。このことから、本研究で試作した混合装置は、水と同等の物性を持つ液体に対しては、効率的な混合処理を実現できる可能性をもつことが期待できる。

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、攪拌翼の磁気浮上機構の検討を行った。本研究では攪拌翼を磁気浮上させる方法として、角型の永久磁石を放射状に配置し、さらにその磁石の配列にハルバツハ配列を採用した。本装置においては、永久磁石のみによる攪拌翼の安定な磁気浮上は実現できなかったが、磁気力測定実験及び磁気力の解析によって、この磁石配置の磁気ばね特性を確認した結果、本混合装置の磁気浮上機構として利用できることを確認した。また、水中における攪拌翼の振動特性を確認し、本混合装置で採用した磁気浮上機構において、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装置の改良を行っていく予定である。

終わりに、本研究は、平成28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、斉藤 文良、佐藤 省一、平田 雄志編：攪拌・混合技術、アイピーシー、1998.
- 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. Paten 5, 178461, 1933.
- 4) 大村 直人、小村 崇信ほか 4 名：振動型混合装置“VIBRO MIXER”の混合特性、化学工学会、化学工学論文集、第 30 巻 1 号、pp.1-6、2004.
- 5) 近藤 優也、岡部 匡、濱畑 貴之、白山 智洋：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)、宮崎大学工学部紀要、Vol. 45、pp. 51-56、2016.
- 6) 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、pp. 503-508、2001.