宮崎大学学術情報リポジトリ
University of Miyazaki Academic Repository

磁気浮上攪拌翼を利用した振動型混合装置の開発(攪拌翼の低振動数域の共振の利用)

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): Forced Vibration, Nonlinear Vibration, Vibrating Mixer, Magnetically Levitated Fin 作成者: 臼山, 智洋, 岡部, 匡, 濱畑, 貴之, 近藤, 優也, Usuyama, Tomohiro, Okabe, Tadashi, Hamahata, Takayuki, Kondoh, Yuya メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/5869

磁気浮上攪拌翼を利用した振動型混合装置の開発（攪拌翼の低振動数域の共振の利用）

臼山　智洋 a)・岡部　匡 b)・濱畑　貴之 c)・近藤　優也 a)

Development of Vibratory Mixer by Using Magnetically Levitated Fin (Utilization of Resonance Vibration with Low Frequency of Stirring Fin)

Tomohiro USUYAMA, Tadashi OKABE, Takayuki HAMAHATA, Yuya KONDOH

Abstract

In order to improve mixing efficiency for mixing process, vibratory mixer using stirring fin levitated in mixing tank by magnetically repulsive force is developed. Stirring fin performs reciprocating motion by excitation of periodical motion of external magnet form outside cylindrical mixing tank. Mixed liquid in the mixing tank can be isolated from external environment by adopting this excitation method, and then contamination into a mixed liquid can be prevented. In order to vibrate the string fin largely by magnetic repulsive force, magnetic spring with soft spring characteristic to support the stirring fin is used. This magnetic spring have strongly softening nonlinearity. The greatest characteristic of the developed vibratory mixer is to utilize nonlinear resonance effectively. In order to clarify vibration characteristics of stirring fin, some experiments are executed. The frequency responses of peak-to-peak (pp) amplitude and waveforms of stirring fin are shown. When stirring fin is excited in mixing tank filled with water, pp amplitude of stirring fin is about 67 mm at resonance frequency 2.1 Hz. This vibration of the string fin with low frequency and large amplitude can be used effectively for various liquid-liquid or liquid-powder mixing. In addition, damping coefficient of the stirring fin in the water is identified by the phase-method. It is confirmed that damping coefficient of stirring fin in mixing tank changes depending on the frequency.

Keywords: Forced Vibration, Nonlinear Vibration, Vibrating Mixer, Magnetically Levitated Fin

1.　はじめに

攪拌・混合操作は化学工業を始め、産業のあらゆる分野で用いられている重要な生産プロセスの一部である。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、高速度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。このタイプ以外では、液体混合の目的、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。回転翼型を利用した混合装置においては、混合効率を改善するために、様々な種類の攪拌翼が利用されている。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おり、攪拌翼の形状は、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、回分操作を基本としているため、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。

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

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

して期待されている。

本研究では、この振動型混合装置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混合装置の開発を行う。この装置の攪拌翼は磁気反発力によって攪拌層内で浮上し、周期変動する磁場により加振される。この機構の採用により、攪拌槽内の液体と外部環境との分離が可能になり、従来の振動型混合装置が有する混合液への不純物混入といった問題を解決できる。既報[5]で製作した振動型混合装置の攪拌翼は漸硬型の非線形復元力特性を有するものであったが、本研究では、攪拌翼を低振動数域で大振幅振動させることを目的とし、漸軟型の非線形復元力特性を有する装置へと改良を行った。また、攪拌翼の運動を数値解析する際に必要である、攪拌翼の減衰係数を位相法[6]により求めた。本報告では、製作した振動型混合装置の概要を説明し、さらに攪拌槽内の液体中で振動する攪拌翼の振動特性と攪拌翼の減衰係数測定実験について報告する。

2.　振動型混合装置の構造

2.1　基本構造

本研究で製作した振動型混合装置の全体図と攪拌部の構造図を図 1、2 に示す。本混合装置は攪拌部と加振部から構成される。攪拌部は実際に混合操作を行う部位であり、本装置の攪拌翼は攪拌槽内で磁気反発力により浮上している。攪拌部の下には攪拌部と独立するように加振部が設置されている。この加振部は、攪拌部の外部から永久磁石の回転運動により、攪拌翼を磁気励振させる。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、従来の振動型混合装置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 64mm の 3 個の中空パイプ P_1, P_2, P_3 と攪拌ユニット M で構成される。攪拌ユニットには内径 44mm の中空パイプを使用している。中空パイプ P_3, P_1 にはそれぞれ液体の注入口と排出口が設けられており、パイプ P_3 から注入した液体が上下振動する攪拌翼により攪拌ユニット内で混合処理され、パイプ P_1 から混合処理された液体は排出される。なお、攪拌部は支持プレート S_1, S_2 により外部フレームに固定されている。

図 3 に本装置の攪拌翼を図 3 に示す。本装置の攪拌翼は、攪拌プレート、永久磁石、中空シャフトから構成され、これらが一体となって運動する。攪拌プレートは、図 4 に示すように、直径 40mm、厚さ 3mm の円板状のプレート 3 枚から構成される。3 枚のプレート間の隙間は 6mm である。攪拌翼はセンターシャフトにより、その運動方向を鉛直方向に拘束されている。3 枚の攪拌プレートの内、1 段目と 3 段目のプレートにはそれぞれ直径 4mm の 4 個の液体通過孔を設けている。2 段目には 4mm×4mm の正方の切り欠きを 4 箇所設けた。各プレートの液体通過孔及び切り欠き部は、互いに円周方向に 45° 位相を違えるように設置している。攪拌翼を構成する永久磁石 A_1, A_2, C の内、A_1, A_2 を攪拌部に設置された永久磁石 B_1, B_2 とそれぞれ反発する向きに設置することにより、攪拌翼は磁気反発力を受けて攪拌槽内で磁気浮上する。また、攪拌翼下部の永久磁石 C は、加振部の永久磁石 D_1, D_2 による周期的に変化する磁気反発力を受け、その結果攪拌翼は励振される。

実際に混合処理が行われる攪拌ユニットの構造を図 5 に示す。既報[5]で製作した振動型混合装置では、直列に連結した 3 個の各攪拌ユニットに対し、それぞれ 1 個ずつ攪拌プレートを設置している。本研究では、既報[5]で製作した混合装置の改良により攪拌翼が大振幅で上下運動し、

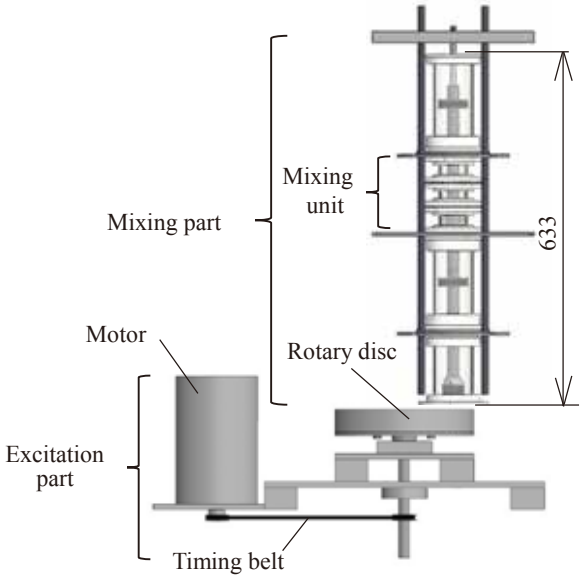


図 1.　振動型混合装置の全体図.

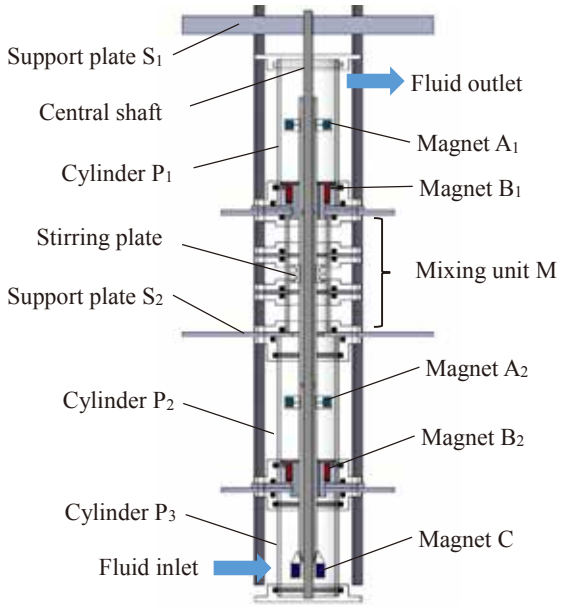


図 2.　攪拌部.

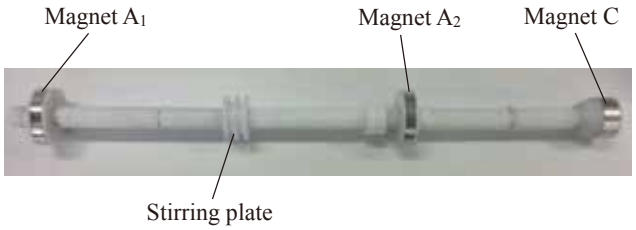
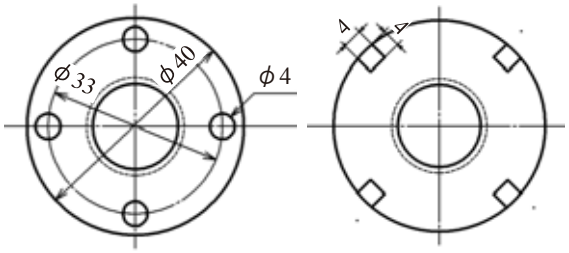


図 3.　攪拌翼.



1、3 段目　　2 段目

図 4.　攪拌プレート.

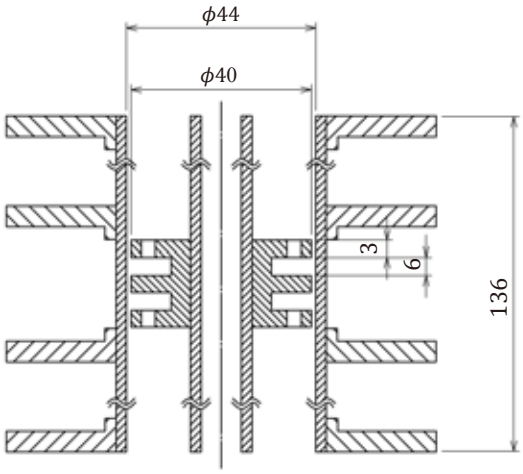


図 5.　攪拌ユニット.

その結果として攪拌翼と攪拌部の部品との接触が想定された。そこで本研究では、図 2 に示すように攪拌ユニット M に 1 個の攪拌プレートを設置した。

2.3　加振部

加振部を図 6 に示す。加振部は、AC モータの動力軸をプーリーとタイミングベルトを介して直径 250mm の円盤（図 7 参照）を水平面内で回転させる機構になっている。モータ側と円板の速比は 1:1 である。円盤内には永久磁石 D_1, D_2 が組み込まれている。円盤の回転により発生する不釣り合い慣性力の発生をなくすため、駆動軸の中心に対して対称な位置に同一サイズの磁石を 2 個配置した。モータが回転すると永久磁石 D_1, D_2 を内包した円盤が回転し、その周期的に変動する磁気力が攪拌翼の永久磁石 C に作用する。永久磁石 D_1, D_2 と永久磁石 C は反発力が発生するように互いに同極を対向させて設置している。この加振方法の採用によりモータの回転数を変化させるのみで、攪拌翼に作用する加振振動数を変更することができる。

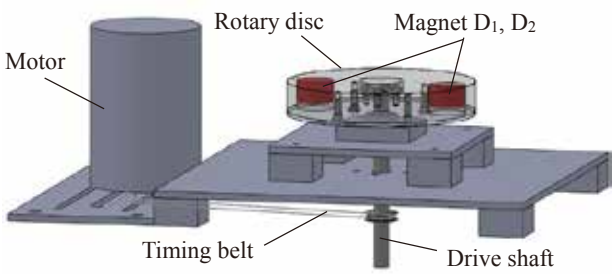


図 6.　加振部.

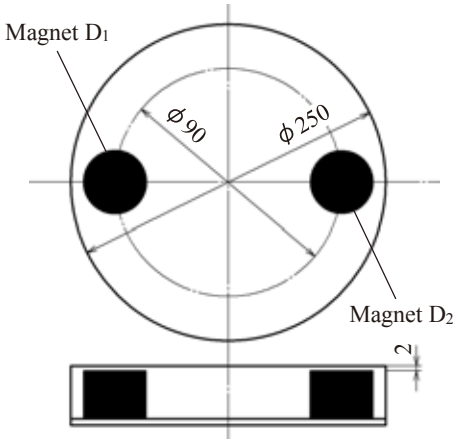


図 7.　加振部の回転円盤.

表 1.　永久磁石の仕様.

Magnet	Size[mm]	Adsorptive Power[kg]	Grade
A_1, A_2	ϕ50×ϕ34×10	43	N40
B_1, B_2	ϕ52×ϕ19×37	39	N40
C	ϕ39×ϕ19×15	35	N40
D_1,D_2	ϕ50×30	88	N50

なお、本装置で使用する磁石は、すべてネオジム磁石を用いた。本装置で使用した磁石の仕様を表 1 に示す。

3.　攪拌翼の振動特性実験

攪拌翼の振動特性を明らかにするために、攪拌翼の加振実験を実施した。実験は加振部の AC モータの運転振動数 f を 1.5Hz～10Hz まで 0.1Hz 刻みで増加させていき、攪拌槽内で上下振動する攪拌翼の両振幅値を測定した。攪拌槽は液体（水）で満たされており、攪拌翼は液体中で振動する。攪拌翼の変位の計測には、レーザー変位計［(株) キーエンス LK-500］を使用した。攪拌翼の上端にデータ収集用のプレートを取り付け、攪拌翼の鉛直方向変位を計測した。

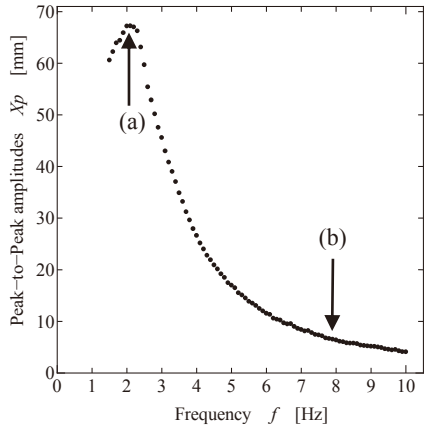
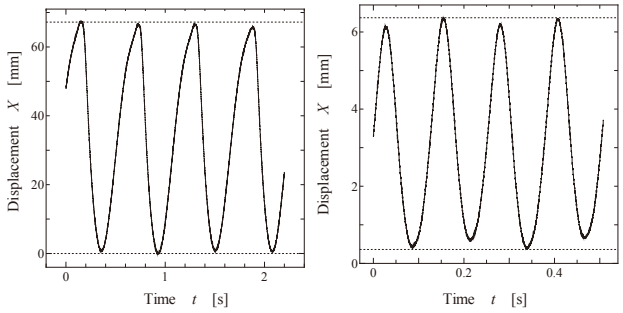


図 8.　攪拌翼の両振幅の周波数応答曲線.



(a)　2.1Hz　　(b)　8Hz

図 9.　攪拌翼の振動波形.

攪拌翼の振幅の周波数応答曲線を図 8 に示す。横軸は加振振動数 f [Hz]、縦軸は両振幅値 X_P[mm]である。図 9 には加振振動数 2.1Hz と 8Hz の時の振動波形を示す。加振振動数 2.1Hz において共振が発生し、そのときの両振幅値は 67.22mm であった。また、8Hz における両振幅は 6.37mm であった。また、図 9 に示されるように攪拌翼は、ほぼ正弦波状の振動を行っていることが確認できる。既報 [5]で製作された振動型混合装置の攪拌翼は、図 3 に示す攪拌翼に取り付けられた永久磁石に対し、その両側からそれぞれ互いに反発する向きに永久磁石を設置することで攪拌翼を磁気浮上させるものであった。これは装置の振動系の磁気ばねを固くすることにより、攪拌翼の固有振動数を上昇させ、より高い共振振動数域で攪拌翼を振動させることを目的としていた。このときの攪拌翼の振動系は、漸硬型の非線形復元力特性を有している [5]。上記の攪拌翼の浮上機構に対し、本研究では、攪拌翼に取り付けられた永久磁石の片側にのみ永久磁石を設置し、それらの磁気反発力によって攪拌翼を磁気浮上させている。このような簡単な機構の変更により、本装置は低振動数領域において攪拌翼を大きく振動することができる。また、従来の機械駆動式の振動型ミキサーにおいては、混合液の物質に依存するものの、攪拌翼の振動数が 15Hz 以上、攪拌翼の両振幅値 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。本装置はこの機械駆動式振動型ミキサーとは対照的に、攪拌槽内の攪拌翼の運動は、大振幅かつ低振動数域で往復運動するものである。このような攪拌・混合処理の形態が求められる場合に有効利用できるものと期待できる。

4.　攪拌翼の減衰係数測定実験

4.1　位相法

液体中で運動する物体の減衰能については、その大きさを評価することは困難である。そこで本研究では、液体中で運動する攪拌翼の減衰係数の測定方法として、高減衰時においても減衰係数の測定が可能である位相法 [6]を用いた。図 10 の位相法による減衰測定実験に対する解析モデルを示す。位相法では、図 10 に示す基礎部分と被支持体の変位の位相角 $\phi-\gamma$ [rad]を測定して減衰を求める。ばね係数 k [N/m]のばねによって支持される被支持体の質量を m [kg]、系の粘性減衰係数を c [Ns/m]で表し、a_0 [m]を基礎部の振幅、ω [rad/s]を基礎部の強制変位角振動数、t [s]を時間、基礎部の強制変位を $x_0 = a_0 \sin\omega t$ と

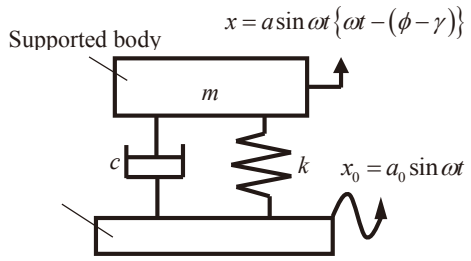


図 10.　減衰係数測定実験の解析モデル

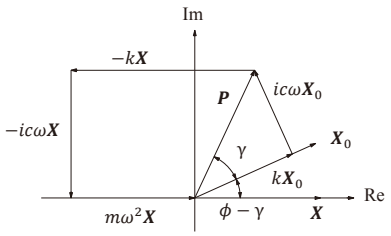


図 11.　力の多角形.

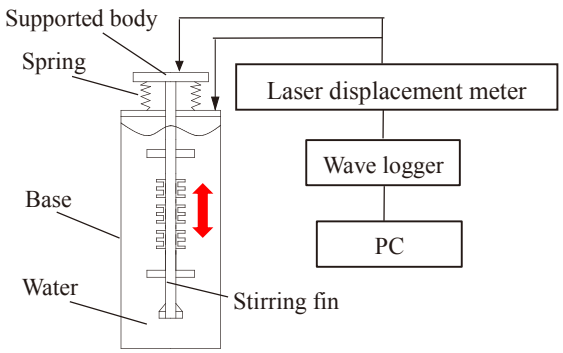


図 12.　減衰係数測定装置計測システム.

とする。また、a [m]を被支持体の振幅とし、その変位を $x = a\sin\omega t\{\omega t - (\phi - \gamma)\}$ とする。図 10 に示す振動系において、被支持体の運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = kx_0 + c\dot{x}_0 = P_{ea}\sin(\omega t + \gamma) \tag{1}$$

ここで、P_{ea} は等価加振力、γ は基礎部の変位と等価加振力の位相角である。式(1)をベクトル表示すると次式を得る。

$$m\ddot{\boldsymbol{X}} + c\dot{\boldsymbol{X}} + k\boldsymbol{X} = k\boldsymbol{X_0} + c\dot{\boldsymbol{X}}_0 = \boldsymbol{P} \tag{2}$$

ここで、

$$\left.\begin{aligned} &\boldsymbol{X_0}\text{:可動基礎部の変位ベクトル} = a_0 e^{i\omega t} \\ &\boldsymbol{P}\text{:等価加振力ベクトル} = P_{ea} e^{i(\omega t + \gamma)} \\ &\boldsymbol{X}\text{:支持体の変位ベクトル} = a e^{i(\omega t - \phi + \gamma)} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式(2)を図示すると、図 11 の力の多角形が得られる。図 11 から次の関係式を得る。

$$\left.\begin{aligned} &|ic\omega\boldsymbol{X}| = |k\boldsymbol{X_0}|\sin(\phi - \gamma) + |ic\omega\boldsymbol{X_0}|\cos(\phi - \gamma) \\ &|m\omega^2\boldsymbol{X}| + |k\boldsymbol{X_0}|\cos(\phi - \gamma) = |ic\omega\boldsymbol{X_0}|\sin(\phi - \gamma) + |k\boldsymbol{X}| \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式(3)を式(4)に代入して c について解くと、

$$c = \frac{m\omega\sin(\phi - \gamma)}{(a/a_0) + \dfrac{1}{(a/a_0)} - 2\cos(\phi - \gamma)} \tag{5}$$

式(5)から、基礎部の振幅 a_0 [m]、被支持体の振幅 a [m]、位相角 $\phi - \gamma$ [rad]を測定すれば任意の振動数における減衰係数 c [Ns/m]が求まる。

4.2　実験方法と実験結果

減衰係数測定実験の計測システムを図 12 に示す。被支持体のプレートは攪拌翼と固定され、4 個の圧縮ばねにより支持される。外部フレームに固定された攪拌槽（基礎部）を加振装置によって強制振動させせることにより、被支持体と攪拌翼は圧縮ばねを介して一体となって振動する。実験は攪拌槽内を水で満たした状態で、加振振動数 f を 1Hz～30Hz まで 0.5Hz 刻みで増加させていき、基礎部及び被支持体の変位を計測した。変位の計測にはレーザー変位計を使用した。

減衰係数測定実験の結果を図 13 に示す。横軸は加振振動数 f[Hz]、縦軸は攪拌翼の減衰係数 c [Ns/m]である。図 13 に示す斜線部分は減衰係数の測定不能範囲を表している。これは、加振振動数 20.5Hz～23Hz において、共振現象によって被支持体が激しく横揺れし、被支持体の変位が計測できなかったためである。また、共振現象が生じる前の加振振動数 1～20Hz において、攪拌翼の減衰係数を最小二乗法で近似すると、液体（水）中で振動する攪拌翼の減衰係数の値は 60～90Ns/m の間で変化することが分かった。本実験結果から、加振振動数の変化に伴い攪拌翼の減衰係数の値も変化することを確認した。

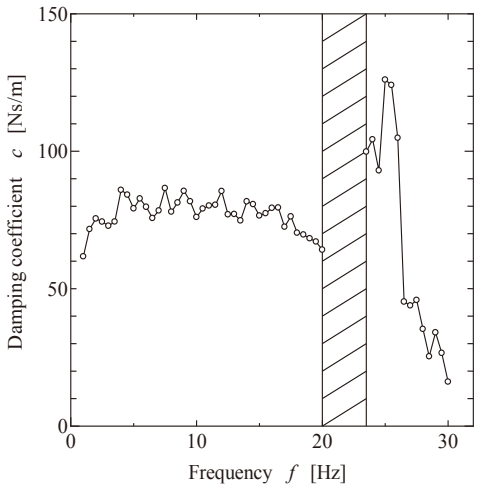


図 13.　減衰係数測定の実験結果.

5.　結論

本研究では、既報[5]で製作した振動型混合装置に対し、液体中において攪拌翼を低振動数域で大振幅振動させることを目的とし、攪拌翼の磁気浮上方法の改良を行った。製作した装置を用い、攪拌槽内を水で満たした状態で攪拌翼の振幅の周波数応答を確認した。攪拌翼は共振振動数 2.1Hz において両振幅で 67.22mm 振動することを確認した。また、液体（水）中で振動する攪拌翼の減衰係数を位相法[6] を用いて測定した。測定結果から、攪拌翼の減衰係数の値は 60～90Ns/m の間であり、その値は加振振動数によって変動することを確認した。今後は、混合する液体の種類によって攪拌翼の振動特性がどのように変化するか、攪拌槽内の液体の流れ確認、最適な攪拌プレートの形状や個数などについて、実験と数値解析の両面から検討していく必要がある。

最後に、本研究は、平成 27 年度科学研究費基盤研究（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) 竹下浩史，岡部匡，濱畑貴之， 他 2 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，第 43 号，pp. 153-158，2014.
6) 関口久美，浅見敏彦：大きな減衰の測定法，日本機械学会，日本機械学会論文集(C 編)，47 巻 422 号，pp. 1317-1325，1981.