

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)

西林 航¹⁾・岡部 匡²⁾

Development of Vibratory Mixer Using Magnetically Levitated Fin (Improvement of Exciting Method of Fin and Identification of Damping Coefficient of Vibrating Fin in Water)

Wataru NISHIBAYASHI, Tadashi OKABE

Abstract

In order to improve the mixing efficiency for liquid-liquid or liquid-powder, vibratory mixer using levitated fin by magnetically repulsive force of a pair of permanent magnet is developed. The fin is excited by the outside magnetic force fluctuating periodically and performs reciprocating motion in cylindrical mixing tank. Some experiments are performed to clarify the characteristic of the motion of the fin and the frequency responses of the motion of the fin are show. The analytical model of the levitated Fin becomes the nonlinear oscillator because the magnetically repulsive force has strong non-linearity. The equation of motion of the fin with non-dimensional form is derived. The damping coefficient is an important parameter to specify the motion of the magnetically levitated fin in the water. In general, it is difficult to estimate the damping coefficient of oscillator when the damping capacity is very large. In this study the damping coefficient of vibrating fin in water is identified by using the phase method. It is confirmed that the damping coefficient of vibrating fin in water is changed greatly by the frequency.

Keywords: Nonlinear vibration, Vibratory mixer, Magnetically levitated fin, Damping coefficient

1. 緒言

食品、医療品、化粧品、化学工業をはじめ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行程の一つとして、液体と液体または液体と粉体の攪拌、混合、溶解がある。近年、種々の物質生産において、従来にも増してこれらの行程に対して高速化、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・混合装置の多くは攪拌槽内を回転翼で攪拌するタイプのものである。しかしながら、このタイプの攪拌・混合装置は、装置が大きくなる上に、混合効率が非常に悪く、また、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。これらの問題点を解決したものとして、振動型混合装置がある。この振動型混合装置とは、攪拌層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り、それによる動力損失、摺動部から攪拌層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。これらの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¹⁾。

この装置は磁気反発力によって攪拌フィンを攪拌層内に浮上させることによって、従来の振動型混合装置では不可能だった攪拌層と外部環境との分離を実現した。この振動型混合装置の攪拌フィンは、攪拌槽外部の周期変動磁場による励振で攪拌槽内で振動し、磁気ばねにより構成される振動系の非線形共振を利用して、攪拌フィンを大振幅かつ高振動数で振動させることが可能となる。磁気浮上用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るので、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、振動型混合装置の実用化を目的として、既報¹⁾で提案した混合装置に対して、攪拌フィンの加振方法、攪拌槽などの改良を行った試作機を製作した。本論文では、まず、実際に製作した磁気浮上攪拌フィンを利用した振動型混合装置の概要について述べた後、攪拌フィンの運動方程式の定式化を行う。また、この振動型混合装置の攪拌フィンの振動特性を評価するためには、数値シミュレ

1) 機械システム工学専攻大学院生

2) 機械システム工学科准教授

ーションの実施が必要不可欠であり、その際フィンの振動特性を正確に評価しておくことが重要となる。本研究で扱う液体中で運動する攪拌フィンのように大きな減衰をもつ系の場合には、正確に減衰能の大きさを同定することは困難である。そこで、本研究では、実際に使用する攪拌フィンの減衰係数を求めるため、高減衰時でも適用可能である位相法²⁾を用いて本装置の攪拌フィンの減衰能の評価を行ったのでここに報告する。

2. 磁気浮上攪拌フィンを用いた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。以下に本装置の特徴を説明する。

(1) 本振動型混合装置は、磁気反発力によって攪拌層内で浮上した攪拌フィンを周期変動する磁場によって外部より強制的に振動させて攪拌を行う装置である。これによって攪拌層と外部環境の分離が可能となり、従来の振動型混合装置の問題点を解決することができる。

(2) 攪拌フィンの両端に二つの永久磁石 A'、B' を取付け、それと同極が対向するように攪拌層下部、上部に永久磁石 A、B を設置している。また、攪拌フィン中央部にも永久磁石 C'、攪拌層中央部に永久磁石 C を同極が対向するように取付ける。この永久磁石 A、A' 及び B、B' の磁気反発力の合力により攪拌フィンを浮上させる。これらの永久磁石には、ネオジウム磁石を使用した。

(3) 攪拌層内の液体の運動が確認できるように、攪拌層にはアクリルパイプを使用した。攪拌槽下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、攪拌槽上部の排出口から主液と副液の混合液を排出する。攪拌槽は、内径 90mm の 3 個のアクリルパイプ P1~P3 で構成され、それぞれのアクリルパイプの間には、4 か所に穴をあけた仕切り板 Q1~Q3 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 ユニットのみに基礎実験を実施した。

(4) 図2に攪拌フィンの羽根部プレート、図3に攪拌フィン全体図を示す。この攪拌フィンは中央の羽部と両端に取付けた永久磁石 A'、B' 及び中央に取付けた永久磁石 C' とそれらをつなぐ 2 本のシャフト S₁、S₂ によって構成されている。攪拌フィンの羽根部は、図2に示すように 4 か所に穴をあけた半径 40mm の円形のアクリルプレート 3 枚で構成されている。

(5) 水環境に適用できるように中心軸と攪拌フィンの摺動部はフェノール樹脂製すべり軸受けを使用した。このすべり軸受けにより、攪拌フィンは上下方向の運動に拘束さ

れ、かつ攪拌フィンの中心軸まわりの回転を防止している。(6) 永久磁石 A の周期的運動によって、攪拌フィンに作用する磁気力が変化し、攪拌フィンが励振される。永久磁石 A の駆動にはスライダ・クランク機構を使用し、モーターの回転を偏心カム及びピリンクを介して往復運動に変換している。このような加振方式を採用したことで、加振部と攪拌層は完全に分離でき、スライダクランク機構のつり合い慣性力により発生する振動が攪拌槽に伝わることを防いでいる。

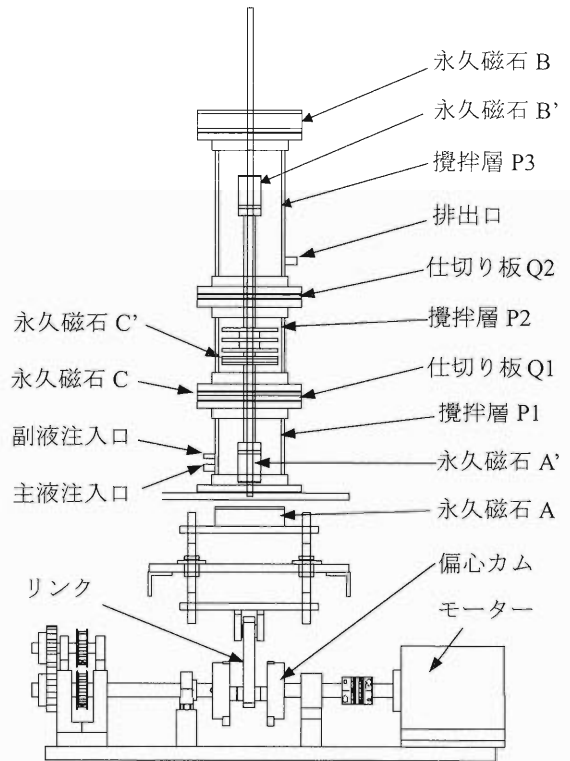


図1. 振動型混合装置全体図.

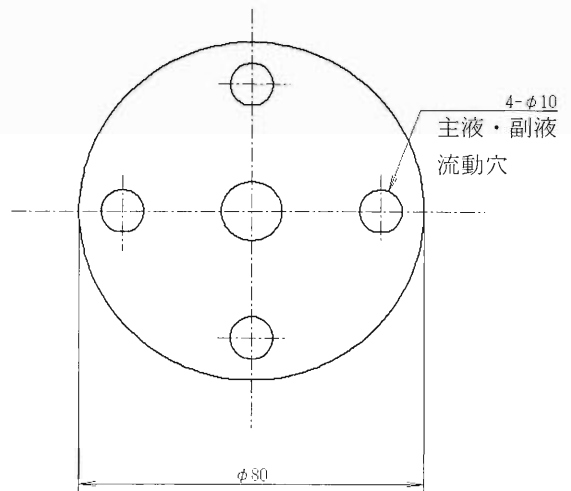


図2. 攪拌フィン羽根部.

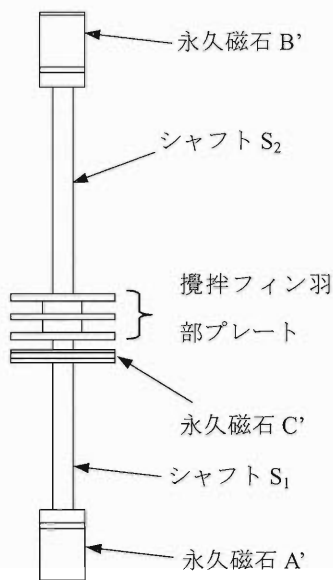


図 3. 攪拌フィン全体図.

3. 攪拌フィンの運動方程式

攪拌フィンの解析モデルを図 4 に示す。中心軸により運動方向が鉛直方向のみに拘束された磁気浮上型攪拌フィンを、質量 m [kg] の浮上物体とする。攪拌フィンは永久磁石 A、B によって挟まれており、永久磁石 A、A' 及び永久磁石 C、C' の磁気反発力によって浮上している。攪拌層仕切り板 Q1 に取り付けられている永久磁石 C の上面と攪拌フィン中央部に取り付けてある永久磁石 C' 下面までの浮上距離 x [m] とおく。また、スライダ・クランク機構により往復運動する基礎部の強制変位を $S(\omega t)$ とする。ここで、 ω [rad/s] は永久磁石 A（基礎部）の強制変位の角振動数、 t [s] は時間である。この強制変位 $S(\omega t) = 0$ 、すなわち $\omega t = \pi/2$ のときの永久磁石 A の上面と永久磁石 B の下面までの距離を L_1 [m]、永久磁石 B の下面と永久磁石 C の上面を L_2 [m]、永久磁石 B' の上面と永久磁石 C' の下面の距離を L_3 [m]、永久磁石 B の上面と永久磁石 A' の下面の距離を L_4 [m] とする。図 4 に示す攪拌フィンの解析モデルの運動方程式は次式となる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + mg - F_1(x) - F_2(G_1 + x) + F_2(G_2 - x) = 0 \quad (1)$$

ここに、 m [kg] は浮上体質量、 c [Ns/m] は系の減衰係数、 $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ [N] は、それぞれ永久磁石 A、A' と C、C' 間の磁気ばね関数である。式(1)中の G_1 、 G_2 は次式で表される。

$$G_1 = L_1 - S(\omega t) - L_4 - L_2 + L_3 \quad (2)$$

$$G_2 = L_2 - L_3 \quad (3)$$

本装置では、モータの回転運動から永久磁石 A の往復運

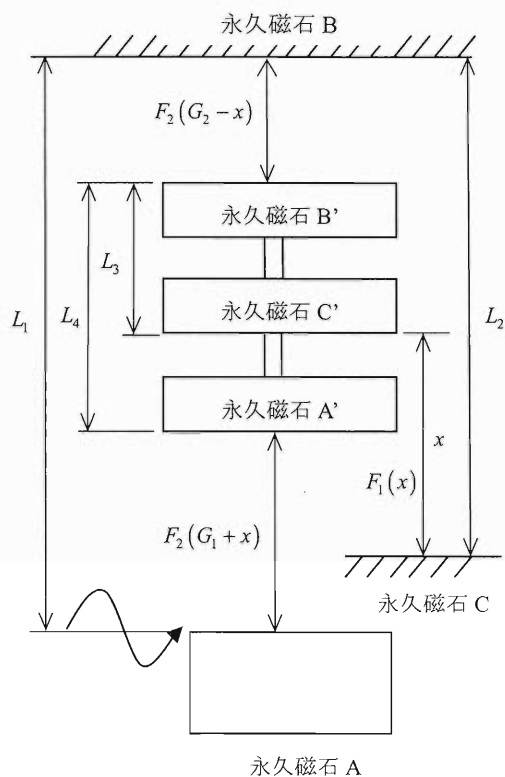


図 4. 攪拌フィンの解析モデル.

動の変換機構に加振機構にスライダ・クランク機構を使用している。 $t=0$ において、永久磁石 A が最上部に位置していた場合の永久磁石の A の変位 $S(\omega t)$ は、次式で表される。

$$S(\omega t) = a \left\{ 1 - \cos \omega t + \frac{b}{a} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \sin^2 \omega t} \right] \right\} \quad (4)$$

ここで、 ω [rad/s] はクランクの回転角速度、 a 、 b [mm] は、それぞれクランクとコネクティングロッドの長さである。また、磁気ばね関数 $F(x)$ は、本装置に使用したネオジム磁石の磁気反発力の近似式⁴⁾として次式を用いた。

$$F(x) = A \left(\frac{D}{B+x} \right)^2 + C \quad (5)$$

ここで簡単化のために

$$E = AD^2 \quad (6)$$

と置く。

式(5)中の定数 A 、 B 、 D 、 C は、磁気反発力を測定値し、その結果を最小自乗近似することにより決定できる⁴⁾。表 1 には B_1 、 C_1 、 E_1 、 A_2 、 B_2 、 D_2 、 C_2 の値をまとめた。これの変数において下付添字 1 は、永久磁石 CC' 間、下付添字 2 は永久磁石 AA' 間の磁気ばねの定数を表している。また、図 5、6 には、永久磁石 AA'、及び CC' の磁気反発力の計測値及び式(5)による近似結果を示す。実線が式(5)による近似式、○が実験結果である。図 5、6 から、式(5)による近似式は、実験結果とよく一致していることが確認できる。

表1. 磁気反発力の近似式のパラメータの値.

B_1	0.008765
C_1	0.053988
E_1	0.004855
A_2	122.8205
B_2	0.01685
C_2	-6.2541
D_2	1.85500

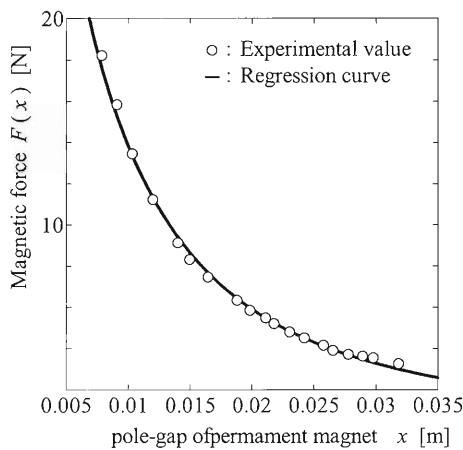


図5. 磁気反発力実験結果 (磁石 CC'間).

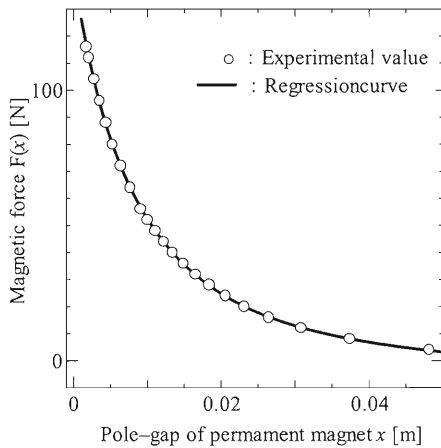


図6. 磁気反発力実験結果 (磁石 AA'間).

4. 水中攪拌フィンの減衰係数の同定

既報¹⁾では、振動する攪拌フィンの運動は、非線形振動系に対する高精度数値解法であるシューティング法⁵⁾を利用して数値シミュレーションを行った。減衰が小さい場合には、Qファクター法³⁾などにより減衰能の評価は可能であるが、水中で振動する攪拌フィンのように減衰が大きい場合には、正確な減衰係数の特定は困難であった。その

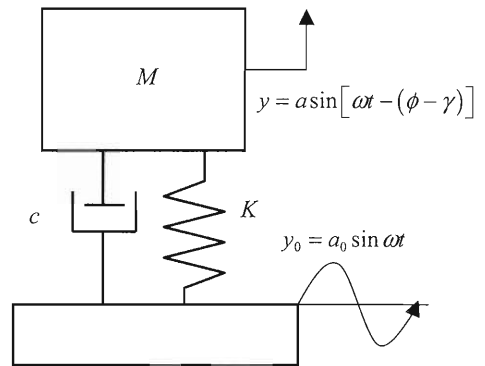


図7. 位相法における解析モデル.

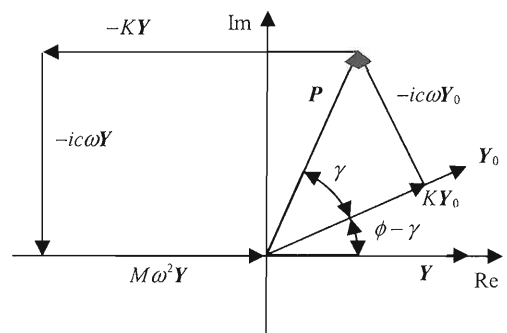


図8. 力のベクトル表示.

ため、数値計算に用いる減衰係数の大きさをほぼ合理的と思われる一定の値に仮定することで数値シミュレーションを行わざるをえなかった。その結果、数値シミュレーション結果は、定性的ばかりか定量的にも実験結果と大きく異なり、信頼性の乏しいものとなった。これは振動数 ω に依存して減衰係数が変化しているにもかかわらず、常に一定値と仮定したことが原因と考えられる。そのため、本研究では、高減衰時においてもその減衰係数を測定可能である位相法²⁾を用いて減衰係数 c を測定する。

以下に、位相法の概要を以下に述べる。図7には位相法の解析モデルを示した。ばね定数 K [N/m]のばねで支持された被支持体の質量を M [kg]とし、被支持体の平衡点を原点とする絶対変位の鉛直方向変位を y [m]で表す。また a_0 [mm]を基礎の絶対変位振幅、 ω [rad/s]を基礎の強制変位角振動数、 t [s]を時間、基礎部の強制変位を $y_0 = a_0 \sin \omega t$ 、粘性減衰係数 c [Ns/m]とする。この振動系の運動方程式は次式で表される。

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + Ky = Ky_0 + c\dot{y}_0 = P_{eq} \sin(\omega t + \gamma) \quad (7)$$

ここで、 P_{eq} は等価加振力、 γ は基礎の変位と等価加振力の位相角を表しており、次式で表される。

$$P_{eq} = a_0 K \sqrt{1 + (2\zeta\alpha)^2} \quad (8)$$

$$\gamma = \tan^{-1} 2\zeta\alpha \quad (9)$$

ここに、

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{MK}}, \quad \alpha = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (10)$$

であり、 ω_n は不減衰固有振動数、 ζ は減衰比、 α は振動数比である。式(7)の定常解は、

$$y = a \sin\{\omega t - (\phi - \gamma)\} \quad (11)$$

と表され、 a [m] は被支持体の振幅、 ϕ は等価加振力と被支持体の変位の位相角である。また、基礎と被支持体の変位角 $\phi - \gamma$ は、

$$\phi - \gamma = \tan^{-1} \frac{2\zeta\alpha^3}{1 - (1 - 4\zeta^2)\alpha^2} \quad (12)$$

となる。ここで式(7)を次のようにベクトル表示する。

$$M\ddot{\mathbf{Y}} + c\dot{\mathbf{Y}} + K\mathbf{Y} = K\mathbf{Y}_0 + c\dot{\mathbf{Y}}_0 = \mathbf{P} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Y}_0 &= a_0 e^{i\omega t} && \text{可動基礎の変位ベクトル} \\ \mathbf{P} &= P_0 e^{i(\omega t + \gamma)} && \text{等価加振力ベクトル} \\ \mathbf{Y} &= a e^{i(\omega t - \phi + \gamma)} && \text{被支持体の変位ベクトル} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$\omega < \omega_n$ のときの式(13)のそれぞれの項のベクトルを複素平面上に図示すると図8のベクトル線図を得る。ここでは便宜上 \mathbf{Y} を実軸上に図示している。位相法とは、図8の位相角 $\phi - \gamma$ を測定して減衰を求める方法である。図8から次の関係式を得る。

$$\left. \begin{aligned} |ic\omega\mathbf{Y}| &= |K\mathbf{Y}_0| \sin(\phi - \gamma) + |ic\omega\mathbf{Y}_0| \cos(\phi - \gamma) \\ |M\omega^2\mathbf{Y}| + |K\mathbf{Y}_0| \cos(\phi - \gamma) &= |ic\omega\mathbf{Y}_0| \sin(\phi - \gamma) + |K\mathbf{Y}| \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

これを解くと、減衰係数 c が次式から求められる。

$$c = \frac{M\omega \sin(\phi - \gamma)}{\left(\frac{a}{a_0}\right) + \left(\frac{a_0}{a}\right) - 2\cos(\phi - \gamma)} \quad (16)$$

また、減衰比は次式から計算できる。

$$\zeta = \frac{\sin(\phi - \gamma)}{2\sqrt{\left\{\left(\frac{a}{a_0}\right) + \frac{a_0}{a} - 2\cos(\phi - \gamma)\right\} \left\{\left(\frac{a}{a_0}\right) - \cos(\phi - \gamma)\right\}}} \quad (17)$$

$\omega > \omega_n$ のときも式(16)と同じ関係式が得られるので、任意の振動数 ω においてこの式を適用することができる。したがって、基礎部と被支持体の位相差 $\phi - \gamma$ 、基礎部の振幅 a_0 [m]、被支持体の振幅 a [m] を測定することで、液中で攪拌フィンが振動する場合のような高減衰時の減衰係数を求めることができる。

5. 減衰係数の同定実験

攪拌フィンの減衰係数を求めるために製作した実験装置の概略図を図9に示す。4本のコイルばね上に支持された可動プレートに攪拌フィンを取り付ける。攪拌フィンは

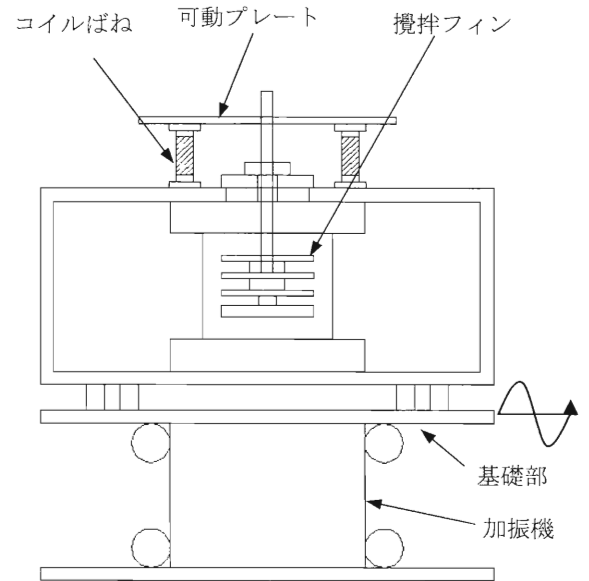


図9. 減衰実験装置の概略図。

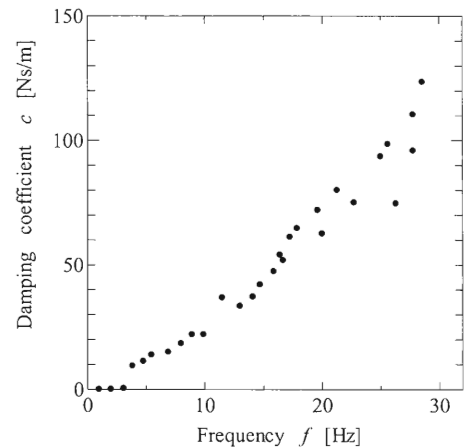


図10. 減衰測定実験結果。

基礎に固定されたアクリルパイプ内を鉛直方向に振動する。アクリルパイプ内には水が満たされている。

図9の実験装置を加振機（明石製作所(株)・UBC-4型振動試験機）上に設置することにより、基礎部に正弦変位を与える。加振振動数は、振動式混合装置の運転範囲の1Hzから30Hzまでとし、振動数は1Hzずつ増加させて測定を行った。加振変位は1Hzから9Hzまでは片振幅5mmとする。10Hzから25Hzは加振機の特性和加振変位を調節することができないが、式(16)においては、基礎部と被支持体の振幅比のみを使用するため、減衰係数の計算に影響はないものとする。各振動数における基礎および被支持体の変位はレーザー変位計（キーエンス(株)・LK-500）を用いて測定した。実験によって得られた水中で振動する攪拌フィンの減衰係数の結果を図10に示す。横軸は周波数

ω [Hz]で縦軸は減衰係数 c である。図 10 からわかるように、水中で振動する攪拌フィンの減衰係数は、振動数に依存して大きく変化する。また、攪拌フィンの減衰係数は図示の振動数域では、 ω が増加するにつれて減衰係数も増加することが確認できる。

6. 攪拌フィンの振動特性

最後に、本研究で製作した振動型混合装置における攪拌フィンの振動特性の確認を行った。攪拌層内には水を流しながら、加振部の加振片振幅を5mm、10mmとし振動実験を行った。加振周波数は1.0Hzから1.0Hz刻みで増加させた。ただし、共振点付近と思われる振動数範囲は0.5Hzきざみで測定を行った。図11、12に実験結果から得られた攪拌フィンの振動のPeak-to-peak振幅の周波数応答曲線を示す。図11、12は、それぞれ加振振幅5 [mm]、10 [mm]とした場合の実験結果である。横軸は加振周波数 ω [Hz]で縦軸はPeak-to-peak振幅 X_p である。図11、12から、加振変位 $a = 5$ [mm]の場合と $a = 10$ [mm]の場合、共に加振周波数が

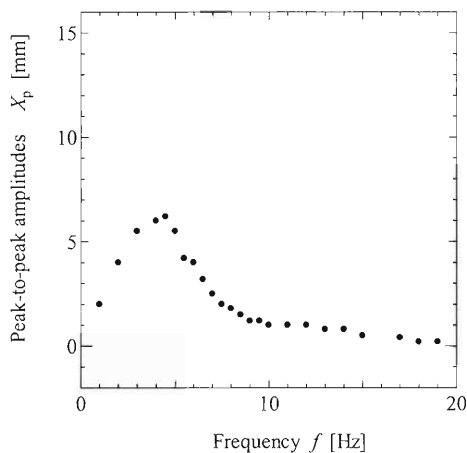


図11. 攪拌フィンの周波数応答曲線 ($a=5$ mm).

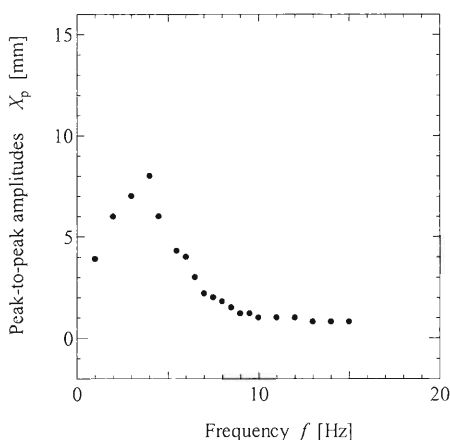


図12. 攪拌フィンの周波数応答曲線 ($a=10$ mm).

約4.5[Hz]で攪拌フィンの共振を確認できた。また、加振変位 $a = 10$ [mm]の場合では、低振動数から共振点までの振幅が加振変位 $a = 5$ [mm]に比べて大きくなっていることが確認できる。

今回の実験では、永久磁石BB'の磁石間距離を比較的大きくしたものであり、その結果、共振は低い振動数で発生している。磁石間距離を調節して、磁気ばねを硬くすれば、共振振動数をより高振動数域に移動させることが可能である。その結果、攪拌フィンを高振動数域で共振を発生させ、大振幅の振動を実現できる見通しである。

7. 結言

本研究では、既報¹⁾で提案した磁気浮上型攪拌フィンを用いた振動型混合装置に対して攪拌フィン加振方法及び永久磁石によるフィンの浮上方法の改良を行い、新たな振動型混合装置を製作した。本研究で試作した振動型混合装置の基本性能を確認するため、装置運転時の攪拌フィンの振動特性を実験によって確認した。攪拌フィンの共振振動数は約5Hzと低いものであったが、使用する磁石間距離の変更で、より高振動数域で攪拌フィンを共振させることが可能であるとの見通しを得ることができた。

また、今後の本装置の改良設計の際に必要な攪拌フィンの運動方程式を定式化を行った。さらに、数値シミュレーションで必要となる水中攪拌フィンの減衰係数を位相法を用いて求めた。実験結果より、水中で振動する攪拌フィンの減衰係数は、振動数に依存して大きく変化する事が確認できた。

今後、本研究で得られた知見をもとに、攪拌フィンの運動の数値シミュレーションを実施し、その結果をもとにさらに本振動型混合装置の改良を行っていく計画である。

終わりに、本研究は、平成22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。

参考文献

- 1) 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, 203-204, 2008.
- 2) 関口 久美, 浅見 敏彦: 大きな減衰係数の測定法, 日本機械学会論文集 (C編), 47(422), 1317-1320, 1981.
- 3) 日本機械学会編: 機械工学便覧基礎編 $\alpha 2$ 機械力学, 37, 2004.
- 4) 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), 58 (546), 635-642, 1992.
- 5) 近藤 孝広, 矢ヶ崎 一幸: 非線形振動とカオスに関する二, 三の最近の話題, 日本機械学会論文集 (C編), 61 (583), 746-751, 1994.