

うず電流を利用した非接触型振動・電圧変換器

—基本特性を知るための解析と実験—

戸 田 圭 一*

Non-contact Type Vibration-Voltage Transducer Utilizing Eddy Current

—Analysis and Experiments of the Fundamental Characteristics—

Keiiti TODA

Abstract

There are many methods to measure mechanical vibration. Each of them has its own individuality of the measurement. The author studied of the new method utilizing eddy current. This transducer can be constructed without contact to the vibrating surface and has a wide frequency range from audio up to some MHz. This paper was described as the analysis and the experiments to get the fundamental characteristics of the apparatus.

1 緒 言

振動を電圧に変換するいわゆる振動・電圧変換器は振動計あるいはマイクロホンなどとして各方面に広く実用に供されている。またそれらに用いられている原理もさまざまである。そしてその原理によつて各変換器は個有の特長と欠点を持つことになり、われわれは使用目的に応じて使いわけている。またその多くは可聴周波数以下の振動を対象にしている。超音波領域の振動に対してはチタン酸バリウムなどの圧電素子が用いられているが機械的共振を利用する単一周波数変換器の場合は別として上限 1MHz 以上の広帯域周波数変換器として用いる場合には感度の低下のため直接あるいは間接に被測定面に接触させる必要がある。従つて膜面の振動測定などの場合には接触のために振動の状況が乱されるので不適當である。一方非接触という点では容量型変換器が考えられるが、これは振巾に比例して出力を生じるから振動のパワーが一定ならば振動数に逆比例して感度が低下する。従つて 1MHz 度まで帯域巾を持たせるには製作技術の点で困難を伴う。これらの欠点を満たすものとして筆者はうず電流を利用した変換器を開発することにした。本論文では簡略化された状況における理論的な解析と特性を知るための実験を行なつた。

2. 原 理

Fig. 1 の導体表面が振動しており、その振動を検出するものとする。振動面の静止位置を基準にとり距離 d_0 に面に平行に一回巻きコイル L が空間に固定されているものとする。コイル L に直流電流 I を流せば導体が強磁性体であるか非磁性体であるかによつて磁束の分布は異なるであろうが、いずれにしても導体中を直流磁界が貫く。この時導体表面が振動をすれば表面の磁界が変化するのでうず電流を発生してコイル L にうず電流による誘導起電力を生じる。

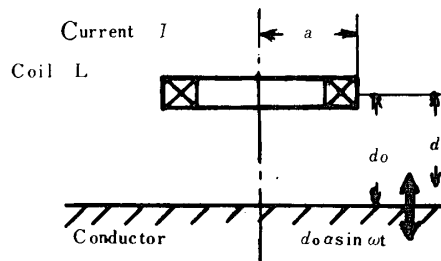


Fig.1 Schematic arrangement of the pick up to the vibrating surface. d_0 is the static distance and d is the instantaneous distance

いまコイル L が半径 a の円形コイルでその厚さは無視できるものとする。また、導体表面は完全無限平

面で面に垂直に $d_0 \alpha \sin \omega t$ であらわされる正弦波振動をしているものとす。この時導体の導電率が大きく、振動が十分に早ければ生じるうず電流はほとんど表面附近を流れる。このうず電流を導体表面を流れる面電流に近似することができれば、すなわち導体を理想完全導体に近似することができる。従つて Fig. 1 における 導体面より上側の電磁界は Fig. 2 のように導体を取り去り導体表面に関するコイル L の鏡像コイル L' を考える。導体面は振幅 $d_0 \alpha$ で振動しているの鏡像 L' は $2d_0 \alpha$ の振幅で振動していることになる。

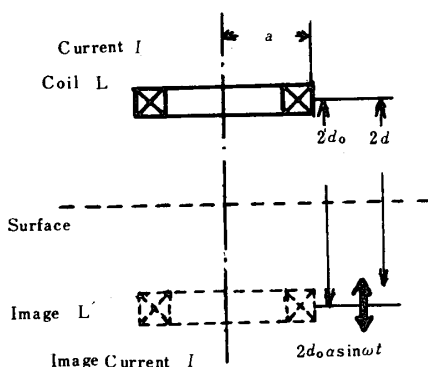


Fig. 2 Schematic diagram of the image method

鏡像 L' にもコイル L と同じ直流電流 I が流れることになるから L' の磁束のうち L に鎖交する磁束を ϕ とし L, L' 間の相互誘導係数を M とすれば

$$\phi = MI \quad (1)$$

となる。従つてコイル L' が L に誘起する起電力 e は I が直流であることを考慮してつぎのようになる。

$$e = \frac{d\phi}{dt} = \frac{dM}{dt} I \quad (2)$$

Fig. 1 に示すように振動する導体面とコイル L との距離の瞬時値を d とすれば L' との距離の瞬時値は $2d$ になる。 L と L' は同軸上にあり半径も同じであるから M の瞬時値が計算できる¹⁾。

$$M = \frac{2\mu_0 a}{k} \left\{ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right\} \quad (3)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率

$$k^2 = \frac{4a^2}{4a^2 + (2d)^2}$$

$K(k), E(k)$ はそれぞれ k を母数とする第1種および第2種の完全だ円積分をあらわす。

ここで $d_0 \ll a$ がなりたつとすれば

$$k \doteq 1$$

となり

$$K(k) \doteq \ln \frac{8a}{d}$$

$$E(k) = 1$$

となる。従つて(3)は

$$M \doteq \mu_0 a \left(\ln \frac{4a}{d} - 2 \right) \quad (3')$$

一方

$$d = d_0 (1 + \alpha \sin \omega t) \quad (4)$$

だからこれは(3')に代入すると

$$M \doteq \mu_0 a (\ln 4a - 2) - \mu_0 a \ln \{d_0(1 + \alpha \sin \omega t)\}$$

さらに、 $\alpha \ll 1$ だから

$$M \doteq \mu_0 a (\ln 4a - 2) - \mu_0 a \alpha \sin \omega t$$

この式を(2)に代入すると

$$e = -\mu_0 a \alpha \omega I \cos \omega t \quad (5)$$

となる。

(5)はこの変換器の出力電圧 e が $\alpha \omega$ に比例するという電磁型変換器としての特性を示している。

つぎにコイル L による直流起磁力を等価な無損失永久磁石に置換する。この時もさきに用いた理想近似が成立つものとするれば鏡像磁石を考えることによつて空間側の電磁界を Fig. 2 と同様に取扱うことができる。すなわち Fig. 2 の L が磁石、 L' が鏡像磁石となり L' は $2d_0 \alpha$ の振幅で振動していることになる。従つて L の位置の磁界も変化するからそれを検出するために L にピックアップコイルを巻いておけば磁束変化に比例して誘起電圧を生じる。この大きさは鏡像磁石がピックアップコイルにおよぼす相互誘導係数さえ計算できれば直流コイルの場合と同じようにして求めることができるが、ピックアップコイルの近傍に磁石という強磁性体があるので M を求めるのは簡単ではない。しかし振動振幅が充分小さい ($\alpha \ll 1$) ならば磁石の特性や構造およびピックアップコイルの構造配置が与えられるならば電磁型変換器の特徴である次式が成立つと仮定してよいだろう。

$$|e| = \beta(d_0) \alpha \omega \quad (6)$$

上式で β は比例係数であるが、 α が極めて小さい時には Fig. 2 で L' が静止していてそれに微小交流電流が流されている時の状況に類似させて考えてよいだろう。このことから β は d_0 の関数になり、 e が ω に比例すると仮定している。

3. 実 験

3.1 ピックアップの構造

原理で述べたようにうず電流による変換器は高周波損失の少ない永久磁石にピックアップコイルをとりつけて導体振動面に近づけるだけでよい。その構造にはいろいろのものが考えられるが本実験では基本的な特性を求めるのが目的であるのでピックアップも Fig. 3 に示すようになるべく平易な形のものを用いた。永久磁石はバリウムフェライト磁石で高周波特性が懸念されるが、磁石に着装した状態でピックアップコイルの Q を測定してみた。Fig. 4 にその結果およびコイル

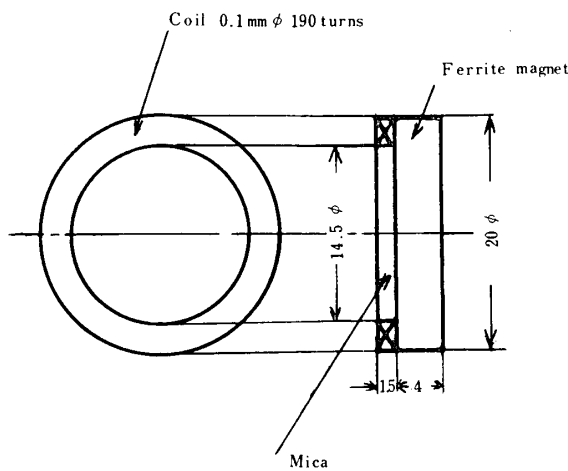


Fig.3 Structure of the pick up

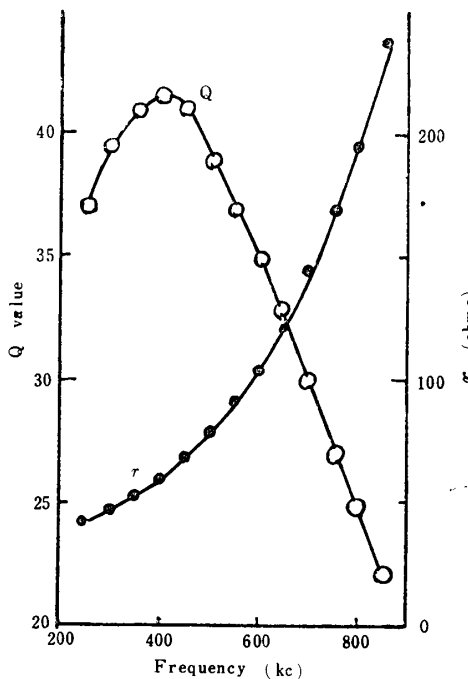


Fig.4 Variations of Q and apparent resistance r of the pick up coil vs. frequency

の実効抵抗を示す。この時の電氣的な共振周波数は約 2 MC であつた。このことからこのピックアップは 1 MHz 程度までは充分に使用できると思われる。実際の使用に際しては振動面に平行にかつコイルを振動面側として使用した。

3.2 振巾特性

直径26mmφの鉄製共振ホーンをもつた20 KHz フェライト振動子の端面にピックアップを適用して振幅・電圧特性を調べた。その結果は Fig. 5 に示すように比例関係が成立している。なお、この時の d_0 は 2 mm であり振幅測定には顕微鏡写真を用いた。

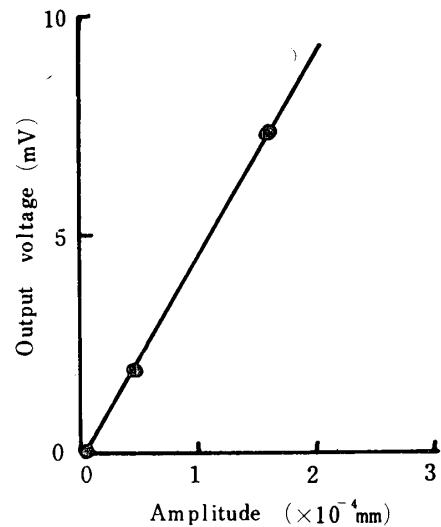


Fig.5 Liner relation between output voltage and vibrating amplitude at 20KHz

3.3 距離変化による感度特性

式(6)の β が距離によつてどんな変化をするか。また e が ω にどの程度まで比例するのかわかる必要がある。そこで20KHz においては振巾特性測定に用いたフェライト振動子のホーン端面の振動を、50KHz, 200KHz, 400KHzにおいてはそれぞれチタン酸バリウム振動子を駆動し油を介して直径31mmφの鉄棒に振動を導きその端面の振動を利用した。駆動入力を一定に保つてそれぞれの端面に対する d_0 を変化させた時の出力を図示したものがFig. 6である。20KHz だけは直接駆動であり振動数も低いので振幅測定は可能であるが他は振幅測定は不能であつた。従つて同図の各振動数における各曲線は振幅に関して互に無関係である。従つて曲線の傾きによつて β の変化を推定するほかはない。その上さきに述べたように20KHz は振動面の材質形状が他とは異り特に振動面の凹凸が異なるから必ずしも他とは同一に論ずることはできないだ

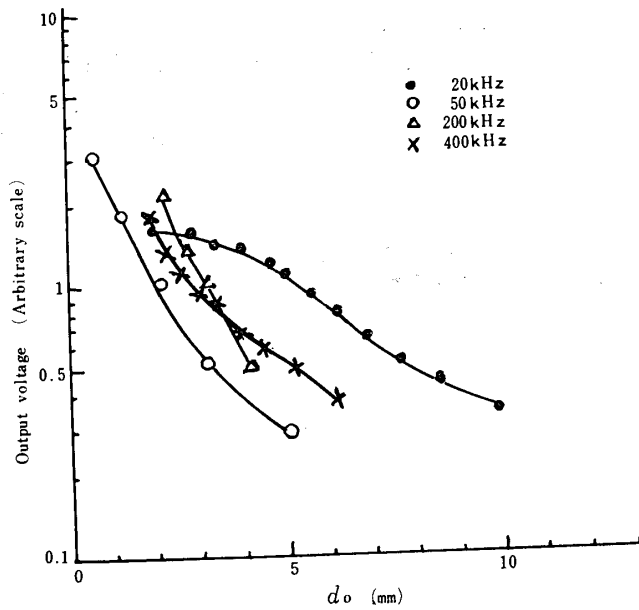


Fig.6 Output characteristics by d_0 when the vibrating amplitude was kept constant at every frequency, but there are no relation between the amplitudes of each frequency

ろう。また50KHz 以上では振幅が小さく迷誘導による雑音のために S/N 比が劣化し特に200KHz のものは振巾が小さかつたので測定はかなり困難であつた。このような理由から Fig. 6 より簡単に結論を求める

ことは危険であるが出力の大きい所では 20KHz 以外の曲線の傾きはかなりそろつている。

4. 結 言

ここに述べた解析および実験は必ずしも満足すべきものではないが、うず電流を利用した振動・電圧変換器が可能であり、周波数常域も予想通りかなり高周波まで使用できることが証明されたことになる。ここに述べた程度のピックアップで 2 MHz においても感度をもつことを最近確認することもできた。非接触広帯域という特長は衝撃波などの過度現象測定に好適と思われる。

超音波領域における振動振幅測定の困難さのために振動数に対する出力特性を求めることはできなかつたがこれを求めることが今後に残された最大の問題点であろう。

最後にこの実験を担当して下さつた大崎宜秀、中野恭介両君に謝意をささげる。

参 考 文 献

- 1) 電気通信学会編“電磁気学”，コロナ社，(1964)，p.212.

(昭和42年11月1日受理)