

自己インダクタンス変化による 変位振動計の試作

〔周波数変調方式による〕

矢 沢 信 八*

(昭和41年10月31日受理)

1. 緒 言

筆者が現在進めている実験研究の測定において、下記のような制約条件、すなわち

- 1) 運動物体の慣性モーメントが小さいので、動歪計のようなもので接触測定することが不可能である。
- 2) 外部から微小な測定圧力が働いても、運動自体が擾乱される。
- 3) 運動はかなり不規則性をもっているものと予想されるので、長時間の観測が必要である。
- 4) 潤滑油が測定面に付着しており、油膜の厚さが絶えず変化する。
- 5) 高速度回転、および荷重条件によって、運動物体の温度上昇がある。

等を有している。最近機械量の測定で、かような条件をもった問題が多く現われ、これに対処するために非接触測定技術の問題が盛んに採り上げられている¹⁾²⁾。また新しい構想によって製作された非接触型の測定器が、いくつか発表されている³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

筆者は上記の諸条件に対して、一般に非接触型測定器として考えられる次の

- 1) 光学的な方法〔投影光又は反射光を利用する方法〕
- 2) 静電容量変換による方法〔運動物体に電極を対向させて、変位を静電容量変化に変換する〕
- 3) 電磁誘導変換による方法〔運動物体に電磁石を対向させて、変位をインダクタンス変化に変換する〕

の中より、3)による方法が最適と考えて、電磁石ピックアップのインダクタンスが運動物体の変位にともなって変化するので、そのインダクタンスの変化分を周波数変調回路に入れて、復調、再生する方式をとった。測定器本体（発振、変調、および直流増幅の各部）は長野市日南田電気株式会社に製作依頼して、筆者は各種の形状および寸法のピックアップを用いて種々実験を行い、その結果大体所期の成果を得たので、以下報告する。

2. 原理の概要

図1のように、被測定体に対向してtの位置に電磁石型ピックアップを置き、その間

* 機械工学教室助手

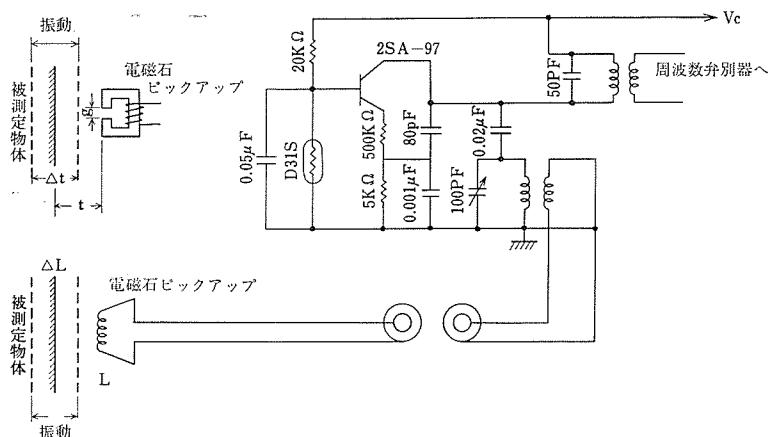


図1 被測定物体と電磁石ピックアップとの位置関係および発振部の回路図

のインダクタンスに同調した周波数を発振させる。その場合のインダクタンス L は、主として磁気回路における磁気抵抗、磁石のスリットからの漏洩磁束、そして高周波磁界による渦電流等によって影響されるが、被測定体と電磁石との間隙が、せまい範囲では、次の式であらわすことができる。

$$L = \frac{k_0}{t} \quad (1)$$

ここで t : 被測定体よりの距離

k_0 : 定数

(1)式より

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{k_0}{t^2} \quad (2)$$

となり、近似的に

$$\Delta L = -\frac{k_0}{t^2} \Delta t \quad (3)$$

で与えられる。一方 L と C の並列共振回路に於ける共振周波数 f は、

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (4)$$

で、 ΔL によって生ずる周波数偏移 Δf は、近似的に、

$$\Delta f = -\frac{1}{4\pi L\sqrt{L \cdot C}} \Delta L \quad (5)$$

で与えられ(3)と(5)より

$$\Delta f = \frac{k_0}{4\pi L\sqrt{L \cdot C} t^2} \Delta t \quad (6)$$

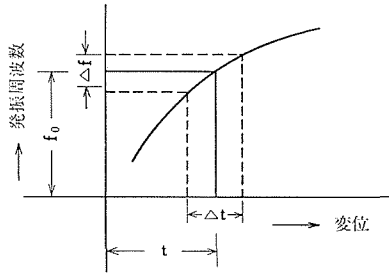


図2 変位-共振周波数の特性曲線

となって図2のような曲線となる。

周波数弁別器または低周波増幅器の出力電圧 Δe_D は Δf に比例するので、その比例定数を k_1 として、(1)と(6)により式を整理すると、

$$\Delta e_D = K \frac{\Delta t}{\sqrt{t}} \tag{7}$$

ただし $K = \frac{k_1}{4\pi\sqrt{k_0C}}$

式(7)より低周波増幅器からの出力電圧 Δe_D は微小変位 Δt に比例し、また Δt に対して Δe_D の変化率は、空隙距離 t の $1/2$ 乗に逆比例する。この関係を利用して運動変位の大きさや、運動の様相を測定することができる。

3. 入出力特性

3-1 ピックアップのスリット巾の大きさを变化させたときの出力電圧特性

各種スリット巾による変位-出力電圧の特性を、図3と図4に示す。この場合被測定物から1mm離れた位置を基準にし、その点の出力電圧をゼロにしてレベルセットする。次に変位を与えて出力電圧を読み取る。

上図からスリット巾が変わると、同一変位に対する出力電圧が変わり、また出力電圧の変化率も変わってくる。特性曲線から変位-出力電圧の直線性は、曲線の微小部分をとって近似的に直線性とするので、変位の範囲が小さければ直線性は良いが、大きくなると当然

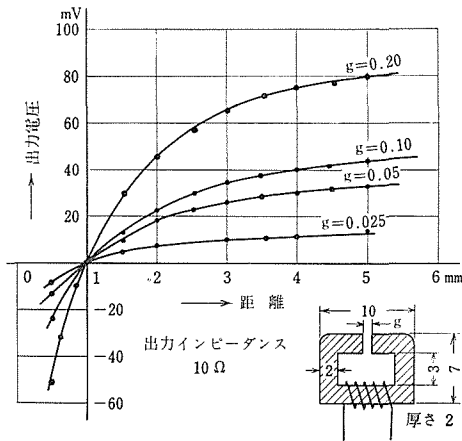


図3 各種スリット巾による変位-出力電圧特性

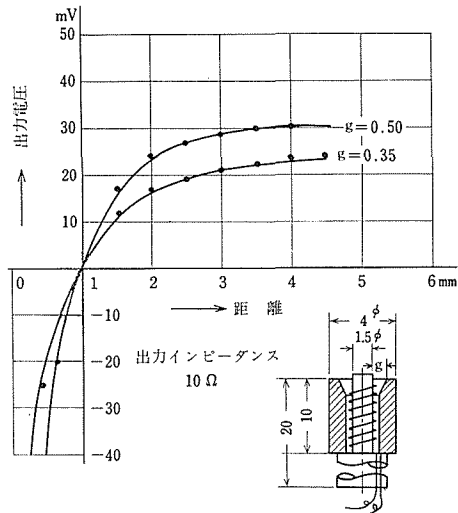


図4 各種スリット巾による変位-出力電圧特性

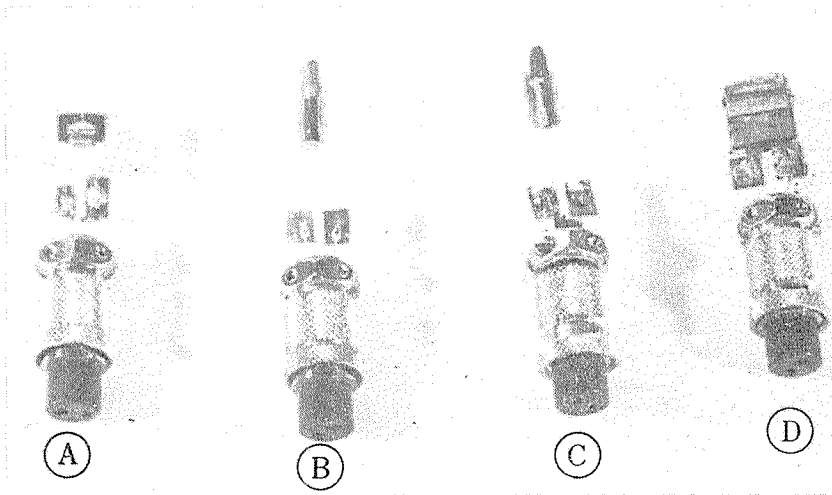


写真1 各種ピックアップの外観

ピックアップの記号	コイル巻数 N	コア各部寸法
Ⓐ	20	
Ⓑ	20	
Ⓒ	20	
Ⓓ	20	Ⓐ と同一寸法 厚さ0.03銅板でスリット部をのぞくすべてをシールドする

表1 各種ピックアップの諸寸法

くずれる。次に写真(1)と表(1)に示すような四種類のピックアップを用いて、直線性の良好な範囲の変位一出力電圧を図5に示す。ピックアップⒶまたはⒹを用いると、 600μ まで変位測定が可能である。

3-2 被測定物の材質と出力特性

被測定物としては、黄銅、鋼（十分脱磁したもの）そしてアルミニウムの三種類を、ピックアップⒶを用いて測定した。その結果を図6に示す。

上図から同一変位に対する出力電圧の大きさは、アルミニウム、黄銅、そして鋼の順になっておる。これは磁気抵抗よりも渦電流効果が大きく影響を与えているものと考え

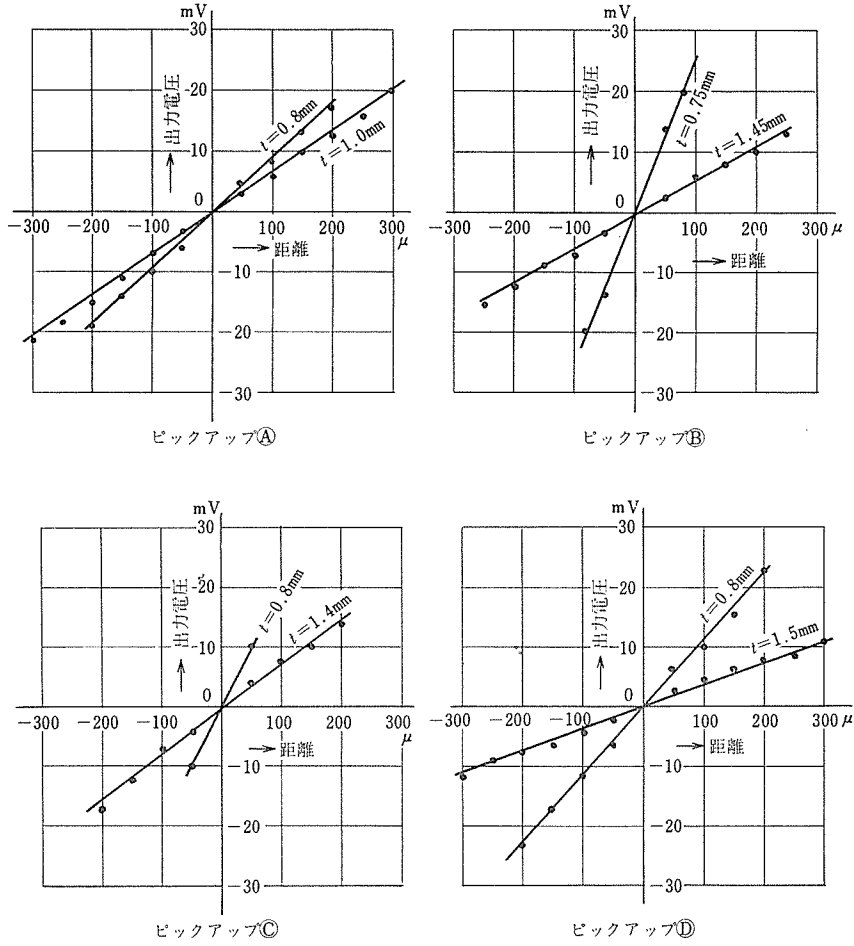


図5 各種ピックアップを用いた場合の変位—出力電圧
(出力インピーダンス 10Ω)

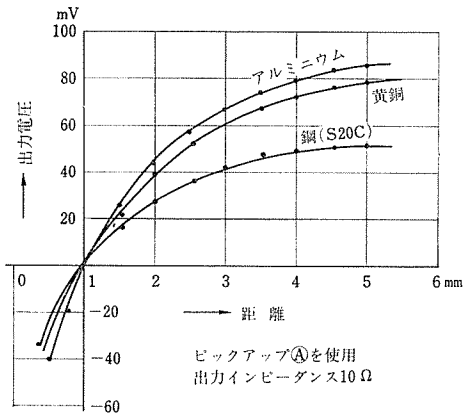


図6 各種材質に対する変位—出力電圧特性

る。この結果から被測定物は、鉄系以外の非鉄金属すべてについても可能である。

3-3 被測定物に各種油を塗布した場合の出力特性

被測定物（黄銅板）にスピンドル油，モビール油そしてグリース等を塗布し，その際油膜の厚さも変えて測定した結果，出力特性には全く変化が認められなかった。

3-4 磁界強さの影響

ピックアップが強い磁界によって残留磁気を帯びたり，また被測定物の磁界によって実際の変位以外に外乱を受ける危険性が，十分考えられる。この磁界強さの影響について，ピックアップ④を使用して測定し，その結果を表2に示す。この場合磁界の強さによる影響を測定器の変位指示計（次節の測定器本体の写真を参照）の針の振れ量で判定した。

表2 各種磁界強さのピックアップへの影響

磁気を帯びた物体	ガウスメータで接触した時の磁界強さ	ピックアップに近づけた際の変位指示計の振れ	ピックアップに接触した後の変位指示計の振れ
銅 球 13φ	(ガウス) 2 ~ 7	正常に振れる。	磁界の影響で，インダクタンス増加の方向に僅かに振れ，離れると直ちに元に戻る
軸受外輪 66φ×80φ×26	2 ~ 7	正常に振れる。	磁界の影響が全くなく，針は振れない。
ドライバーの先端 0.6×3	30~40	3 cm附近から，磁界の影響を受け，インダクタンス増加の方向に振れる。	残留磁気を帯び，徐々に元の位置に戻る。
馬蹄形磁石	200~400	13 cm附近から磁界の影響を受け，5 cm位で針はオーバースケールする。	針はオーバスケールして，しばらく停止し，後徐々に元に戻る。

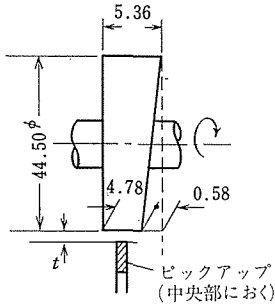
(ピックアップ④を使用)

表2から，被測定物あるいは周囲の磁界強さが，10ガウス以下であれば表4に示すような材質特性をもつピックアップ（フェライト）では，残留磁気または磁界による外乱はほとんど無視できる。

3-5 ピックアップに対して対向面積が変化した場合の出力特性

ピックアップに対して被測定物の測定面が，十分大きければ問題はないが，小さいと運動測定中磁束の一部が測定面から外れて，インダクタンス変化を生じ，変位として現われるので，測定上きわめて不便である。この対向面積変化による影響については，図7に示すように厚さの変化した円板を回転させて，その時の出力電圧の差を測定した。その結果を表3に示す。

表3からピックアップ⑧，⑨および⑩は図7の程度の対向面積変化には，ほとんど影響されない。ピックアップ⑧と⑨は壺型のコアで，磁力線が余り外に広がらないように工夫したもので，表からもわかるように良い成果を得た。また⑩はピックアップ④にただうすい銅板(0.03mm)でシールドしたもので，これも⑧および⑨に劣らない成果を得た。



偏心振れ量……23μ
 端面振れ量……580μ
 材質……黄銅

図7 円板による対向面積の変化

表3 対向面積変化による出力電圧特性

ピックアップ	出力電圧差		
	t = 0.5mm	t = 1.0mm	t = 1.5mm
Ⓐ	2mv	2mv	2.5mv
Ⓑ	0	0	0.2mv
Ⓒ	0	0	0.1mv
Ⓓ	0	0	0.2mv

○端面振れの最大個所と最小個所との出力電圧差, 出力インピーダンス10Ω

3-6 ピックアップの温度特性

周囲の温度変化や、被測定物からの熱輻射によって、ピックアップ（材質はフェライト）はその影響を受けるが、温度変化に対して透磁率変化のきわめて小さいものであるならば問題はない。

表4 ピックアップに使用したフェライト材質特性

初透磁率	400	残留磁束密度	1300 Gauss
温度定数	0°~40°C 15 × 10 ⁻⁶	保持力	0.5 エルステッド
損失係数	1MC 25	キューリ点	200°C
D A 係数	5 × 10 ⁻⁶	比抵抗	10 ¹⁰ Ω-cm
遮断周波数	15MC	比重	5.2
飽和磁束密度	20 エルステッド 3300 Gauss	ヒステリシス損失係数	—

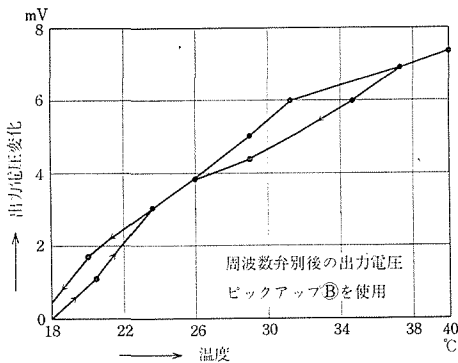


図8 ピックアップの温度—出力電圧特性

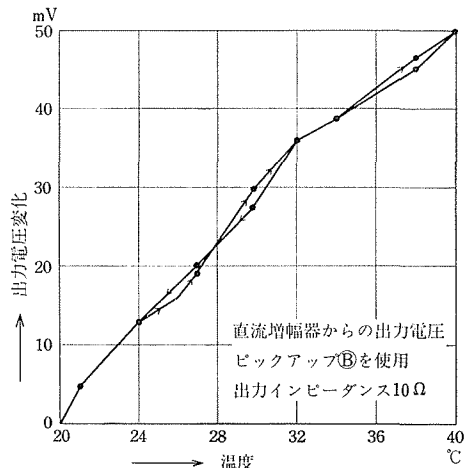


図9 ピックアップの温度—出力電圧特性

今回使用したフェライトの材質特性は表4に示すように、温度定数の非常に大きいものである。図8と9に温度変化による出力電圧特性を示す。温度変化による出力電圧変化の測定は、ピックアップだけを恒温箱の中に入れて、常温(18°C~21°C)から約40°Cまで長時間かけて上昇させ、次に自然放熱で常温まで戻した。

上図から温度による影響が、かなり大きいことがわかる。

4. 測定器本体と性能

外部に製作依頼した測定器本体および性能について以下簡単にのべる。

測定器本体およびピックアップ部の外観を写真2に、また回路のブロック図を図10に示す。

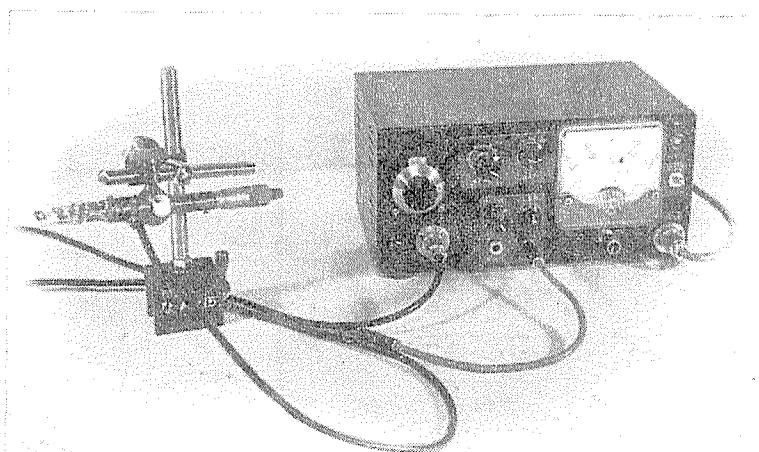


写真2 ピックアップ部と測定器本体の外観

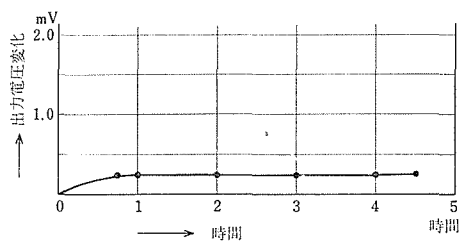
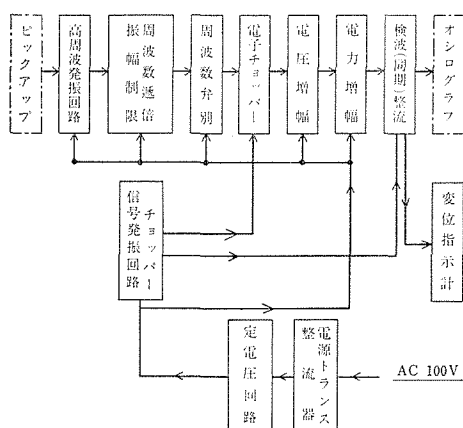


図11 発振部のドリフト特性
(室温17.5°~19°C)

図10 測定器電子回路のブロック図

- ピックアップ部と測定器本体を結ぶコードにおいて、線間容量の変化によって発振周波数が変わることがあるので、この影響を小さくするために、ピックアップのインダクタンス変化を直接共振回路のコンデンサーに結ばないで、図1に示すような相互誘導結合(M結合)にした。
- 周波数変調後のAM成分を取りのぞくために、振幅制限を入れてS/Nを良好にした。
- ピックアップをのぞいた発振部および直流増幅器の時間ドリフト特性を図11と12に示す。
- 直流増幅器の周波数特性を図13に示す。
- 較正は写真2に示すように、ピックアップ部にマイクロメータが取り付けられているので、マイクロメータによって、ピックアップに所定の移動量を与えて、その時の出力電圧変化から較正を行うことができる。

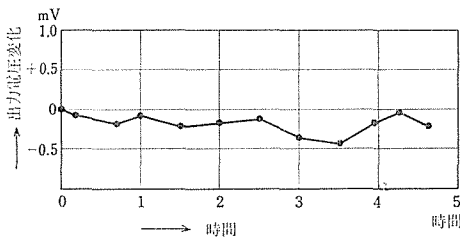


図12 直流増幅器のドリフト特性
(出力インピーダンス 10Ω 、
室温 $17.5^{\circ}\text{C}\sim 19^{\circ}\text{C}$)

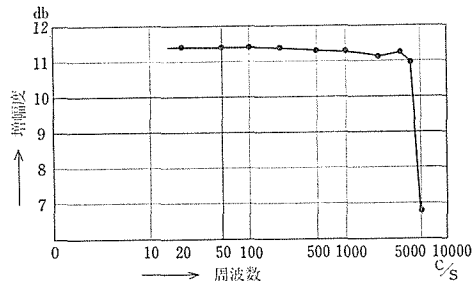


図13 直流電力増幅器の周波数特性

5. 結 論

以上3節と4節からして、

- (1) 測定範囲を小さくすると、良好な直線性が得られ、しかも感度を上げることができる。また感度を下げても(オシログラフを振らせるに十分な電流を確保して) 600μ までは、直線性をもって測定ができる。
- (2) 被測定物は金属全般について可能であるが、その場合の出力特性は、被測定物の透磁率や導電度によって変化する。
- (3) ピックアップの周囲磁界の強さや、被測定物の磁界強さは、極力小さいことが望ましいが、10ガウス以下であれば無視できる。
- (4) 被測定物のピックアップに対する対向面積の変化は、もちろん限度はあるが今回使用のピックアップについては、巾 $4.78\text{mm}\sim 5.36\text{mm}$ の約 0.6mm の変化に対して出力電圧の変化は無視できる。
- (5) 発振部(ピックアップをのぞく)および直流増幅器の時間ドリフトは、安定している。

(6) 測定器の周波数特性は、直流増幅器のそれによって決るが、本測定器では2 kcまで平坦である。

(7) 今回ピックアップに使用したフェライトは、その温度定数が、大変大きいので、周囲の温度変化によって透磁率変化が生じ、出力電圧変化がかなり大きく現われた。

以上の諸特性からして、今回試作した測定器は変位振動計として使用できるものと考ええる。

最後に本測定器を試作するにあたり、絶えず御指導を賜った本学部通信工学科、電気工学科、そして機械工学科の諸先生方に、深甚なる謝意を表する次第である。併せて本測定器試作に当って御協力を頂いた長野市日南田電気株式会社、またフェライト材料について御協力下さったソニー株式会社に厚く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) 日本機械学会第249回講習会、非接触測定技術に関する講習会、昭和41年2月。
- 2) 日本機械学会第43期通常総会懇談会、機械工業における非接触測定、昭和41年4月。
- 3) H.M. Sharf: Noncontacting Gage for Micro-displacements, ELECTRONICS June, 1954 p. 172
- 4) S.K. Rushforth & A.Selwood: A vibration pick-up which does not load the system being examined, Journal of scientific instruments, Vol. 35 Sep 1958
- 5) 内藤 正: 電気試験所研究報告536号, 昭和28年。
- 6) 平井謙次: FM振動計とその応用について, 電子工業, 11. 1963—p 74
- 7) 藤野義一他2名: 非接触形振動計—“ホール効果”を応用した—, 機械の研究第18巻5号(1966) p 45
- 8) H.M. Joseph & P. Newman: 渦電流形変位のトランスジューサ, Trans, AIEE, 74 (1) March 1955 p 39.

Summary

A Trial Production of Displacement Vibrometer Utilizing Variations of Self Inductance.

(Combination of an Oscillator and an Amplifier of Frequency Modulation Type.)

Shimpachi Y_{AZAWA}

(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

When one intends to measure successively displacement of a vibrating object it is apt to be affected by an external mechanical force, it is often unsuitable to use an instrument that needs contact like a strain gage, especially when the moment of inertia of the object is small.

Generally one uses a displacement vibrometer utilizing variations of oscillating frequency due to the impedance in such a case.

The author tried his hand at a displacement vibrometer utilizing variations of self inductance, and obtained a pretty satisfactory result by shaping magnetic core of its detector in a new mode.

Displacement of the object is detected as a variation of oscillating frequency from 2MC, demodulated through a discriminator, amplified and measured with a voltmeter or recorded with an electro-magnetic recorder.

The trial production presented principal results as follows.

- (1) Maximum measurable displacement is 0.6 mm.
- (2) It is applicable to any kind of material. The relation between input displacement and output voltage, however, changes with variations of permeability and conductivity of the measured object.
- (3) The detector performance is not affected by magnetic field from the measured object as long as its strength is below 10 gauss.
- (4) It is neither affected by oil and grease spattered on the detector surface nor that on the measured object surface.
- (5) Ferrite permeability of the detector core changes with environmental temperature. This causes pretty large variation of the detector performance. Therefore, the author recommends ferrite cores with little permeability.