

振動測定法の一提案*

古賀勝之・大崎栄喜

A Proposal of Vibration Measurement Method

By

Katsuyuki KOGA and Eiki OSAKI

This report deals with a new method of vibration measurement and the results of this measurement. The measurement system is basically a noncontacting transducer for the measurement of vibration displacement, which incorporates an electronic circuit in an optical system. The principle of the measurement system is as follows: A beam of light from a light source passes through a condenser lens and an isosceles triangular slit, and strikes a moving object. When the moving object is moved or vibrated in the direction of the sensitive axis of the isosceles triangular slit, the amount of light varies with vibration of the moving object. The amount of light is projected by a convergence lens onto a photosensor. The electrical signal of the photosensor is proportional to the displacement of the moving object and can be observed or measured by standard instruments such as a voltmeter and oscillograph. It has been proved by these experimental results that this measurement method is accurate enough for practical use.

1. まえがき

非接触振動測定器は、振動計センサを振動体に取り付けることによって振動特性に影響を及ぼす場合または帯状をした連続体が長手方向に移動しながら横振動する場合の振動測定に広く用いられている。

しかしながら、従来から用いられている静電容量式、渦電流式などの非接触振動測定器は、振動体が非金属の場合、その振動を測定することができない。そこで、非金属体の振動を非接触で測定するため、既に二、三の測定法¹⁻³⁾が提案されている。

しかし、これらの測定法の特長、測定精度に関しては詳細な報告が行われていない。

一方、最近、研究開発が進んでいる光電式非接触振動測定器は、振動体が非金属であっても振動測定が可能であり、

測定精度も優れているが、構造が複雑で生産コストも高い欠点がある。

従って本報告では、測定原理、構造が簡単で、振動体の材質に関係なく振動測定ができる光電式非接触振動測定法を提案する。

本測定法は次のような基本原理^{4, 5)}を応用した。二等辺三角形スリットから放射された光ビーム中を振動体が振動すると、振動に比例して光量が増加する。この光量変化を光電変換素子で電気信号に変換して、振動数および振幅を測定する。

この原理に基づき測定器を試作し、実験を行った結果、本測定法は、実用的でかなりよい測定精度を有することがわかった。

そこで、今回は測定原理、測定器の試作とその特性および目的への適合性について報告する。

*水産大学校研究業績 第1054号, 1985年7月29日受理。

Contribution from Shimonoseki University of Fisheries, No.1054. Received July 29, 1985.

2. 測定原理

Fig. 1 は測定法の基本構成を示す。Fig. 1 に示すように、光源からの光は、集光レンズを通して二等辺三角形のスリットに放射される。スリットを通過した二等辺三角形光ビームは、スリットの底辺と平行に置いた振動体が光ビーム中をスリットの面と平行な横振動をすると、振動体の変位に比例して光量が増減する。光量変化は集束レンズで光電変換素子に受光される。受信光は光電変換素子で光量の変化に比例した電気信号に変換される。ここで、Fig. 2 に示すようにスリット全面に幅が一様な帯状をした振動体が横振動をする場合、スリットから放射された光ビームの光量変化は、振動体がスリットを遮る面積に比例する。そこで、Fig. 2 の座標系で幅 h の振動体がスリット中央を基準として x 軸の正、負方向に変位する場合、 x 軸からスリッ

ト等辺までの高さ y は、変位 x の関数として次式のように表される。

$$y = \frac{a}{2l}x + \frac{a}{4} \quad (1)$$

ここで、 a はスリット底辺の長さ、 l はスリットの高さを表す。また、振動体変位 x は、 $(-l+h)/2$ から $(l-h)/2$ の範囲とする。従って、Fig. 2 において振動体が光ビームを遮る面積（斜線部分）は、スリットが x 軸に対して対称であるから、式(1)と振動体の幅 h との積の2倍として次式で表わされる。

$$2hy = 2h\left(\frac{a}{2l}x + \frac{a}{4}\right) \quad (2)$$

また、光ビームがスリットを通過する面積 $s(x)$ は、次式のように単純な関数で表すことができる。

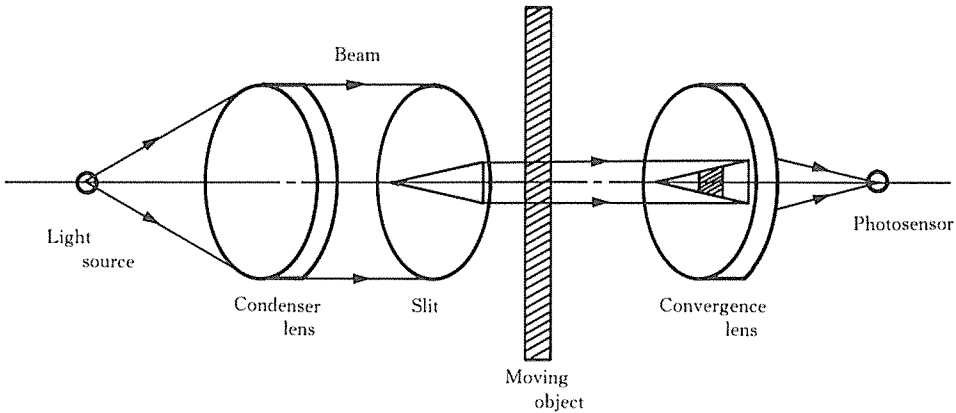


Fig. 1 Fundamental structure of the optical system.

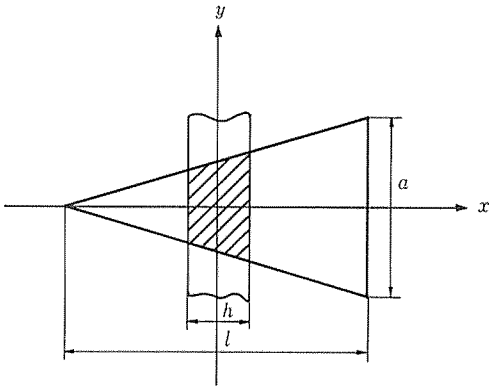


Fig. 2 Geometrical configuration of slit.

$$s(x) = \frac{a}{2l}(l^2 - hl - 2hx) \quad (3)$$

ここで、振動体がスリット中央 ($x=0$) の場合、光ビームの通過する面積は次式で表すことができる。

$$s(0) = \frac{a}{2l}(l^2 - hl) \quad (4)$$

ここで、式(4)を式(3)で無次元化すると次式となる。

$$\frac{s(x)}{s(0)} = 1 - \frac{2h}{l^2 - hl}x \quad (5)$$

この式(5)が光ビーム中を振動体が振動するとき、光ビーム通過面積比(光量変化)とスリット中央からの振動体変位との関係を表す。Fig. 3 は、スリットの寸法を $l=39.2$ mm, $a=10$ mm として、振動体の幅 h (A): $h=20$ mm, (B): h

= 16 mm, ③ : $h = 12$ mm, ④ : $h = 8$ mm, ⑤ : $h = 4$ mm) をパラメータとして式(5)で計算した結果を $s(x)/s(0)$ と x との関係で示す。また、この図は、Fig. 2の座標系で振動体がスリット中央から左方向、右方向に移動したときの変位 x をそれぞれ負および正の値で示す。

Fig. 4は、スリットの寸法がFig. 3と同じで、振動体の左方向への変位 x (① : $x = -10$ mm, ② : $x = -8$ mm, ③ : $x = -6$ mm, ④ : $x = -4$ mm, ⑤ : $x = -2$ mm) をパラメータとして式(5)で計算した $s(x)/s(0)$ と h との関係を示す。

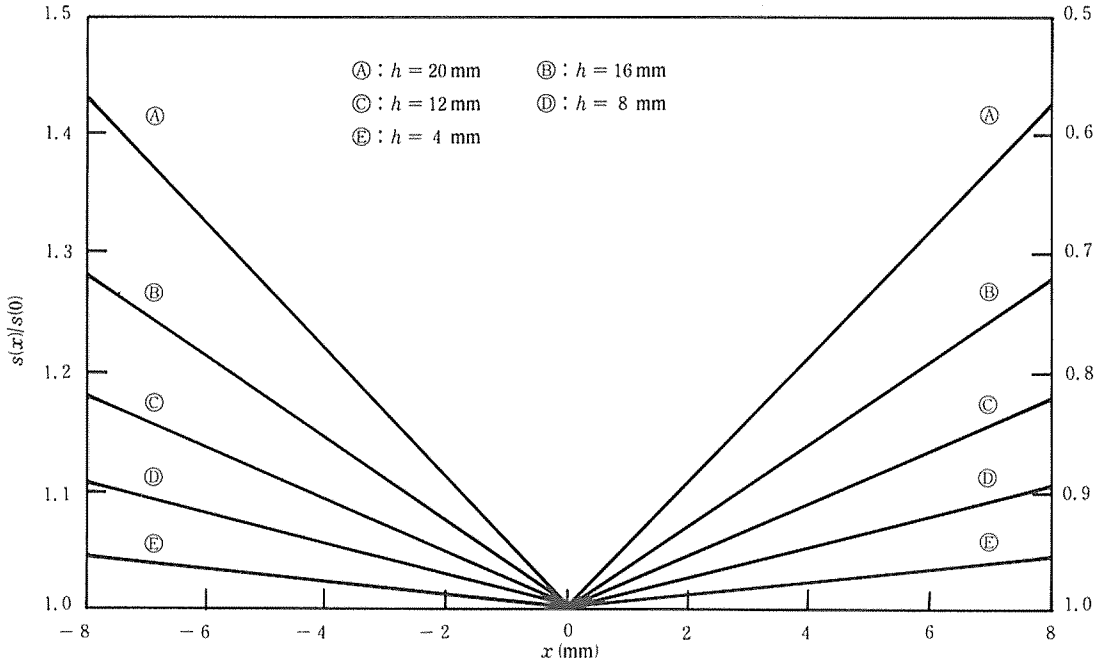


Fig. 3 Relation between $s(x)/s(0)$ and x ($l = 39.2$ mm, $a = 10$ mm).

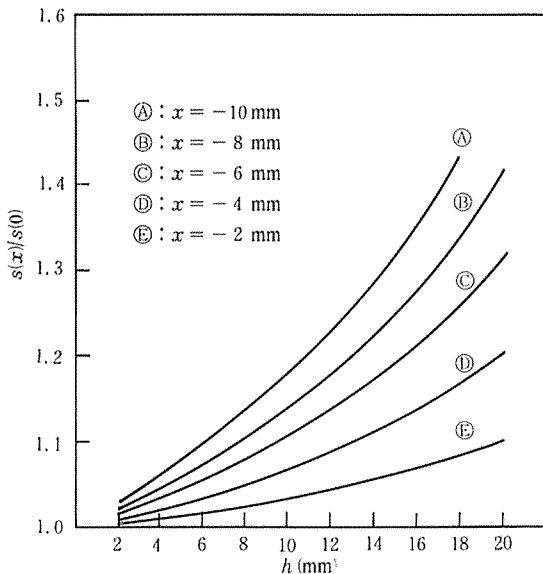


Fig. 4 Relation between $s(x)/s(0)$ and h ($l = 39.2$ mm, $a = 10$ mm).

3. 振動測定器の試作

2. で述べた理論どおり振動の測定ができることを確認するため、振動測定器を試作し、その特性を調べるとともに振動の測定を試みた。

測定器の試作は次の基本方針によった。

- (1) 光ビームの強さの分布が一様性を保つように留意する。
- (2) 光量変化が微小なため、利得の大きなノイズが少ない直流増幅器を使用し、測定精度を向上させる。
- (3) 測定対象とする振動体の幅 h を 4 mm から 20 mm までとして、スリットの大きさおよび測定範囲を決定する。

3.1 試作測定器

Fig. 5, Fig. 6 は試作測定器のブロック線図およびその外観である。本体には、直径75 mm、全長680 mmのステンレス製の円筒を用い、その内部に光の乱反射を防ぐため、

光沢のない黒い塗料を塗った。また、光源②には6 V (30 W) のタングステンランプを使用した。ランプ用電源①には、一定量の光ビームを得るために、直流安定化電源を用いた。光ビームの集光には、振動体の大きさを考慮して、口径60 mm, 焦点距離250 mm の凸レンズ③を採用した。スリット④は、振動体⑤と測定範囲の条件からFig. 2 に示す寸法を $a = 10 \text{ mm}$, $l = 39.2 \text{ mm}$ とし、材料に加工性の良い黄銅を使用した。集束レンズ⑥は集光レンズと同じものを用いた。光電変換素子⑦はホト・ダイオード (S1226-8BK) を使用した。また、電気信号の増幅には

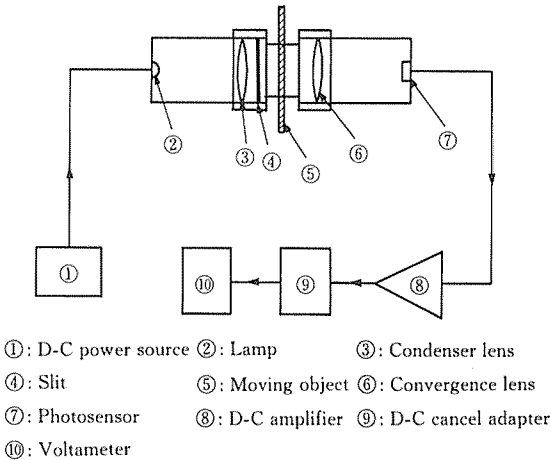


Fig. 5 Block diagram of experimental setup.

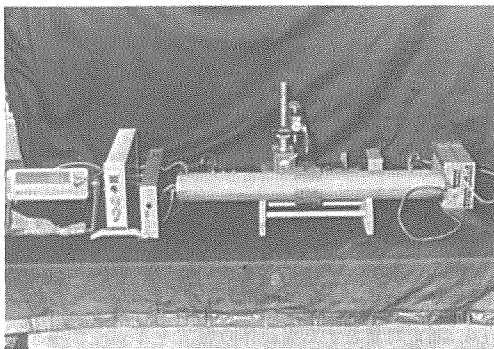


Fig. 6 Exterior view of experimental setup.

利得が約54 dB の直流増幅器⑧を使用した。Fig. 7 のボード線図はこの直流増幅器の周波数特性を示す。なお、図中の●印、○印は、それぞれ利得と位相の実測値を示す。直流分キャンセルアダプタ⑨は、振動体をスリット中央に設

置したとき、直流増幅器からの出力電圧を0 V (零点調整) とし、この点を測定の基準とする目的で用いた。増幅器からの出力電圧は電圧計または記録計⑩で測定した。

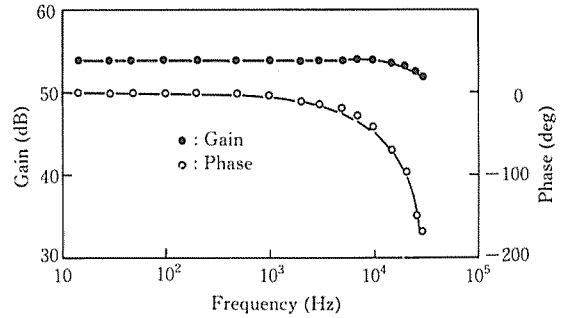


Fig. 7 Frequency characteristics of D-C amplifier.

3・2 特性試験

特性試験は、2. 式(5)の関係を確認するため、Fig. 5 の試作測定器のホト・ダイオードを照度計に替えて、振動体をマイクロメーターで左右に0.5 mm ずつ移動させ、照度の変化を測定した。Fig. 8 の●印は特性試験の一例 ($h = 16 \text{ mm}$) を示す。ただし実測値の縦軸は、式(5)で与えられる計算値と比較するため、振動体がスリット中央にある場

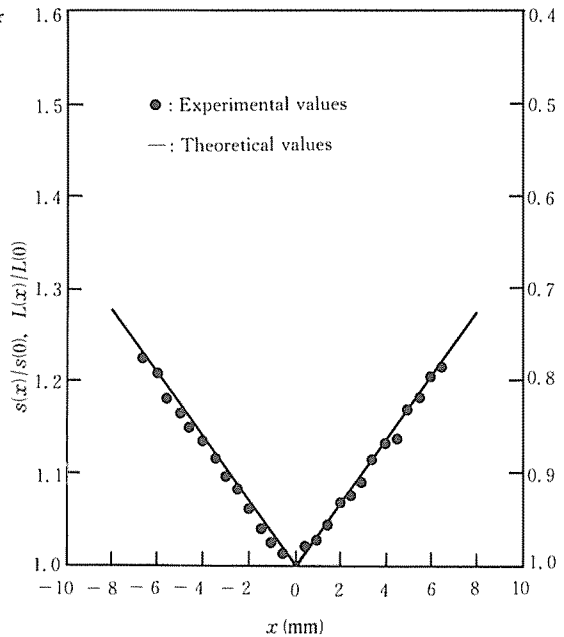


Fig. 8 Comparison of experimental values with theoretical values ($h = 16 \text{ mm}$)

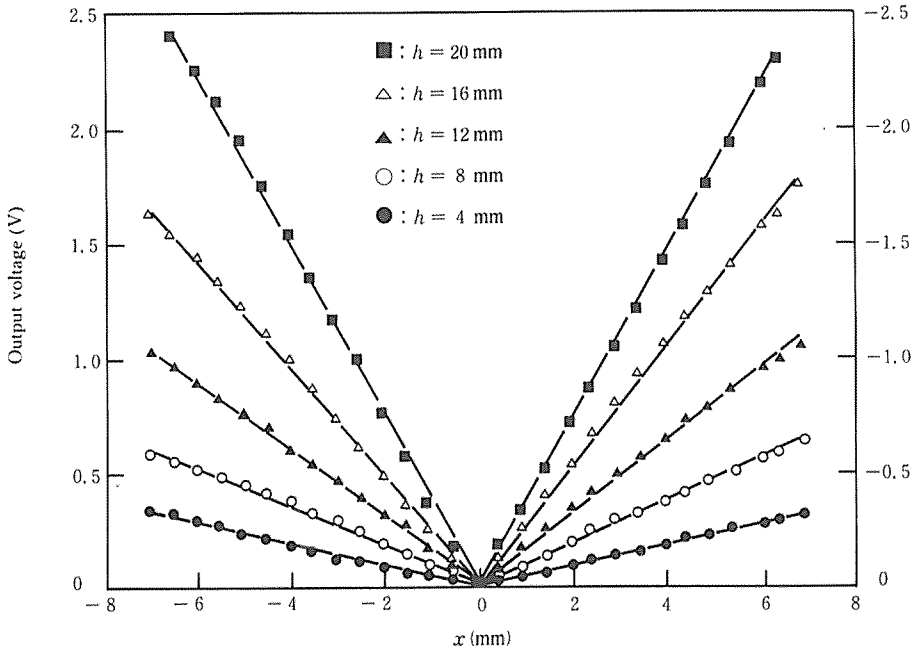


Fig.9 Relation between output voltage and x ($l = 39.2$ mm, $a = 10$ mm).

合の照度 $L(0)$ で振動体を左右に移動させた場合の照度変化 $L(x)$ を無次元化した値 $L(x)/L(0)$ で示した。また Fig. 8 の実線は、式(5)で与えられた計算値であって、実測値とよく一致している。このことは本測定原理の正しさを実証するものである。

一方、実際の振動測定では、振動波形の解析を容易にするため、出力信号を電気信号で検出することが必要である。従って、振動体の変位と出力電圧の変化との関係を求める実験は次のようにして行った。

振動体をスリット中央に設定し、直流キャンセルアダプタで増幅器の出力電圧を 0 V に調整する。この状態を基準として、マイクロメータで振動体を左右に 0.5 mm ずつ移動させ、それぞれの電圧を測定した。この出力電圧は、振動体が中央から左側に移動すると正、右側に移動すると負の値で検出される。この実験結果を Fig. 9, Fig. 10 に示す。

Fig. 9 は、振動体の幅 h (● : $h = 4$ mm, ○ : $h = 8$ mm, ▲ : $h = 12$ mm, △ : $h = 16$ mm, ■ : $h = 20$ mm) をパラメータにして、出力電圧と振動体変位 x との関係を示す。Fig. 10 は、振動体の左方向への変位 x (● : $x = -1$ mm, ○ : $x = -2$ mm, ▲ : $x = -3$ mm, △ : $x = -4$ mm, ■ : $x = -5$ mm, □ : $x = -7$ mm) をパラ

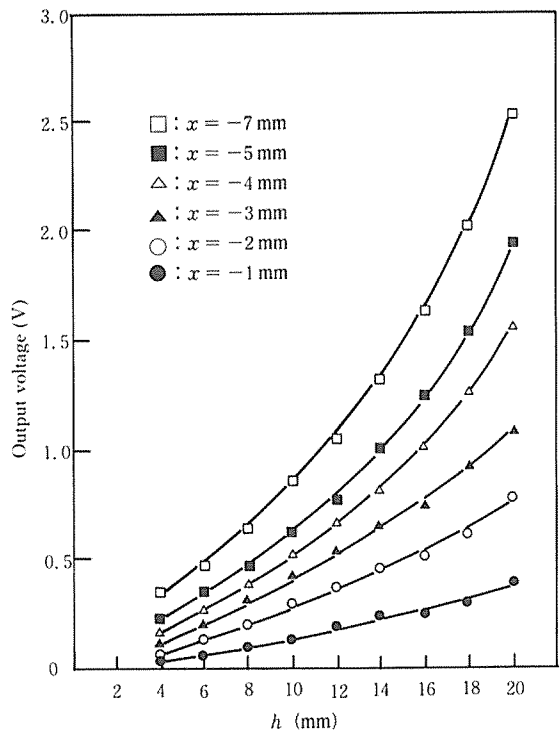


Fig.10 Relation between output voltage and h ($l = 39.2$ mm, $a = 10$ mm).

メータにして、出力電圧と振動体の幅 h との関係を示す。

以上の結果から、計算値を表す Fig. 3, Fig. 4 と実測値を表す Fig. 9, Fig. 10 とは、定性的によく一致していることがわかる。

3・3 振動波形の測定

Fig. 11 は、試作測定器を用いて、強制振動をしているベルトの横振動を測定した波形の一例を示す。ここで、図の(a), (b)は振動数が1.8 Hzと19 Hzの振動波形である。

4. 測定精度

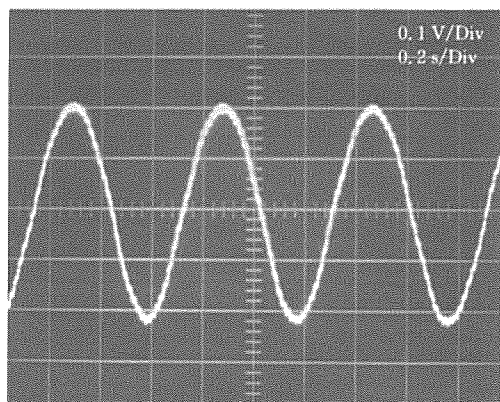
試作した測定器の測定精度について次の2点を検討した。

4・1 周波数特性

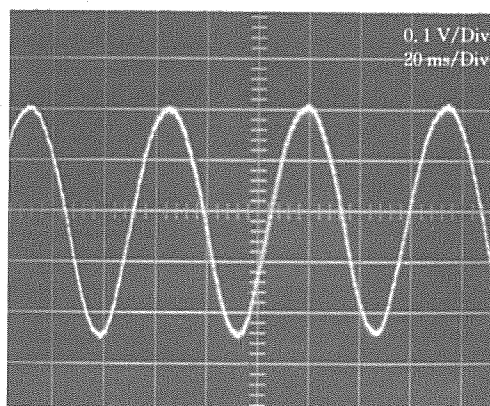
測定に使用したホト・ダイオードは立上がり時間が約 $3 \mu\text{s}$ と非常に高い周波数特性をもっている。そこで、測定器の総合周波数特性は、電圧増幅に用いた直流増幅器の特性で決定される。この増幅器の周波数特性は Fig. 7 に示したとおりである。このボード線図から、測定器の総合周波数特性は、利得および位相を考慮すると、DC～1 kHz の周波数帯域であることが推定される。

4・2 測定感度

測定感度および測定範囲は Table 1 に示すとおりである。



(a) Amplitude: 1.4 mm
Frequency: 1.8 Hz



(b) Amplitude: 1.5 mm
Frequency: 19 Hz

Fig. 11 Typical waveforms of vibration.

Table 1. Accuracy of measurements

Width of moving object h (mm)	Range of measurement x (mm)	Sensitivity (V/mm)
4	-17.6 — 17.6	0.033
6	-16.6 — 16.6	0.070
8	-15.6 — 15.6	0.108
10	-14.6 — 14.6	0.140
12	-13.6 — 13.6	0.187
14	-12.6 — 12.6	0.233
16	-11.6 — 11.6	0.250
18	-10.6 — 10.6	0.297
20	-9.6 — 9.6	0.383

5. あとがき

二等辺三角形の光ビーム中を振動体が振動する場合、光電変換素子の受信光の光量変化を電氣的に処理して振動測定を行う新しい光電式非接触振動測定法を提案した。さらに、提案した測定原理に基づいて試作した測定器を用いて、この測定法の正しさを実証し、実用性を確認した。

得られた結果をまとめると、本測定器は次のような特徴をもっている。

(1) 振動体が光を遮断する材質であれば振動測定ができる。

(2) 光電変換素子に非常に高い応答性を有するホト・ダイオードを採用したので、増幅器の周波数特性を改良することによってDC～約300 kHzの振動測定ができる。

終りに、本測器の試作にあたって協力された水産大学校計測・制御工学研究室研究科生八木省二〔現、日本エヤーブレーキ(株)〕および卒論生藤田憲孝〔現、東京商船大学大学院生〕の諸君に謝意を表す。

文 献

- 1) 中針竜雄：日本機械学会論文集，23，205～210（1957）。
- 2) 清水浩・田村英之・有馬秀紀：九州鉱山学会誌，36，219～226（昭和43年）。
- 3) 清水浩・田村英之・大崎榮喜・塚本頼彦・末岡淳男：昭和43年度日本機械学会中国・四国支部講演論文集，P. 165。
- 4) 五十嵐伊勢美：機械の研究，29，1153～1160（1977）。
- 5) 末岡淳男・田村英之・大崎榮喜：九州大学工学集報，51，269～574（1978）。