

# 光電変換方式による時間関数発生器の特性について

山 口 功\*

(昭和48年5月31日受理)

## 1. ま え が き

一般に機械振動系に加えられる外力は、過渡的、非定常なものを含めて不規則な量であることがしばしばであるが、このような入力信号を電圧にシミュレートするアナログ電圧発生装置は、アナコンの技術としても非常に重要なものであり、演算要素を用いた多数のプログラム方式やそれらの研究があり、特別の波形に対しては専用の装置が工夫されていることは周知のとおりである。

具体的にアナコンで使う時間の関数としては、1) 周期関数 2) 階段関数、インパルスなどの非周期関数 3) 雑音 などがあり、それぞれ広い用途を持っている。例えば周期関数は、機械系に周期的な外力が加えられる振動の問題、構造物の共振の問題、電気回路では本質的に周期関数である交流にかゝわる問題、自動制御系における周期外力、サンプルなどの問題である。非周期関数も、たとえば走行車両の障害物乗越、衝突、落雷、制御系の外乱などを表わす関数として用途が多い。

元来アナコンは繰りかえし同じような計算をする必要がある場合には、手軽でなかなか実用的な計算機であると考えられるので、関数発生器についてもアナコンの特徴に応じた簡便なものが望ましい訳である。筆者はさきに容量変換型の振り振動計を試作して、CFR機関の軸系の振り振動などについて測定し<sup>1)</sup>、その観測結果を軸系の振り振動などの解析に適用するに当たり、任意関数発生器の必要にせまられ、光電変換による一方式を提案し工夫試作したので、本論文では、その原理と構成について詳述すると共にその特性を明らかにし、若干の基礎的事例について適用した演算例を示したものである。

## 2. 原 理 と 構 成

試作して実用に供した任意関数発生器の原理と構成は図1に示すとおりで、所望の関数波形を追跡し光電変換するものであって、原理的には既存のフォトホーマ<sup>3)</sup>などと類似であるが、これらと比較してつぎのような特徴がある。

(1) 本方式は筆者のような電子工学の知識に乏しい者にとって、手近な機械系と光学系から構成されている簡単な装置である。

(2) フォトホーマは曲線図形上に蛍光点を追従させるようなサーボ機構から成りたっているのに対し、本方式は曲線図形を巾の細い光帯で連続的に縦分割し、関数値に比例する反射光量を適当に集光して光電変換している。これによって蛍光点やサーボ機構に伴なう

---

\* 機械工学教室 助教授

問題点である安定性、精度などの解決を比較的容易にしている。

(3) 利用されているものの中で比較的多い関数ポテンション方式のサーボ型関数発生器に比較すると、本方式の応答速度は、はるかに高速であるので使用範囲が非常に広がる。

### 3. 装 置

試作、実験、工夫を繰り返した後実用に供し得るようになった装置は、図1の如くで以下これについて詳述する。

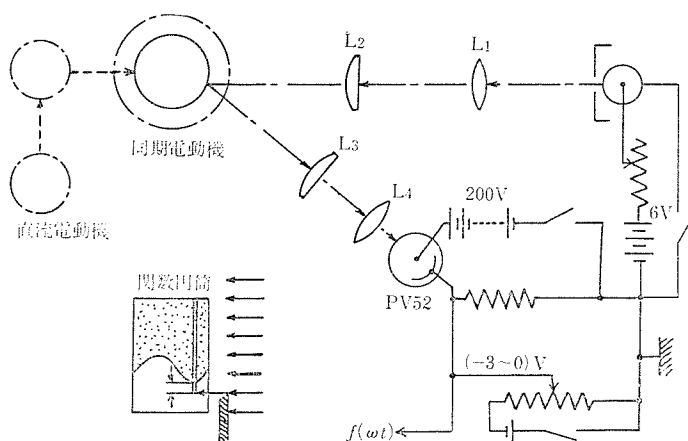


図1 関数発生装置の構成

#### 3.1 送 光 部

光源ランプには6V、10Wタングステン直線フィラメント（長さ約30mm）を用い、直流電圧によって輝度調整をする。この際光源電圧の演算中の降下は直接ドリフトの原因となるから、電源バッテリーには十分な容量のものを使用するか、あるいは電圧を一定に保つような配慮が必要である。

スリットは光量、像などから適宜の寸法にすればよいが、ここでは一応 巾3mm×長さ70mmとした。

レンズはスペースの制約をきびしく考えずにおよそ次の寸法のものを使用した。

$L_1$ ,  $L_4$ （コンデンサレンズ）：口径100mm，焦点距離350mm

$L_2$ ,  $L_3$ （シンドリカルレンズ）：外半径900mm，巾50mm×長さ100mm，焦点距離550mm

光源のフィラメント、スリット、レンズ $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ などの上下、左右、前後の位置関係は関数円筒の表面にフィラメントの、輝度一様で巾の狭い像が最も鮮明に映像されるように調整する。

#### 3.2 関数円筒（ファンクションシリンダ）

これは光帯の反射鏡面となる本装置の主要部分で、実際の諸条件を総合して寸法をき

めたものである。すなわち高さについては、得られる輝度一様な光帯の長さに依存し、外径については、鏡面の一様性を得るための工作の難易、装置の大きさ、曲線のプロット操作、アナログ精度等に関係するから、これらの点を考慮して図2に示すような、諸条件から適当と考えた寸法に定めたものである。従って条件が異れば当然別の寸法であって差支えない。このようにしてきめた寸法に加工した真鍮円筒の外表面を超仕上げした後、クロームメッキを施し、この鏡面に輪廓を所望の任意関数形に切り抜いた無光沢黒紙を糊で貼りつけたものが図5に示す関数円筒である。この関数円筒を縦軸の小型同期電動機（AC 100V, 10W, 1800 rpm）で直結駆動する。また必要に応じて、変速機を経て直流電動機により超低速範囲までの駆動にきりかえることができるようにしてある。

### 3.3 受 光 部

任意関数に比例して関数円筒より輝度変量された反射光束を、光電管感度分布特性に影響されないよう  $L_3$ ,  $L_4$  を通して適當の大きさの面積に集光して、つぎの光電管に照射する。

### 3.4 光電変換部

光電管の特性も本装置の大切な要素で、その光感度の直線性、作動面内の光電面各点における感度の一様性、陽極電圧による出力の飽和特性、光感度分布などT社 PV52について測定した結果、図3a, 3b, 3c, 3dに示す特性が得られたので、この光電管を使用する

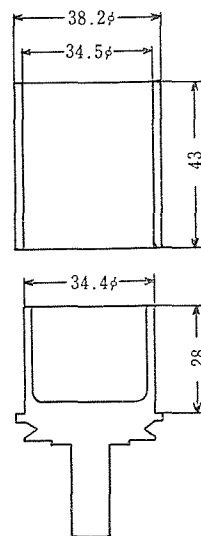
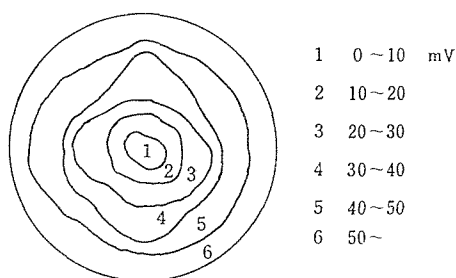
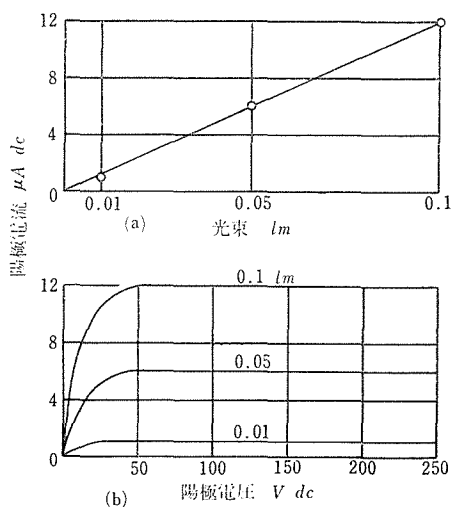
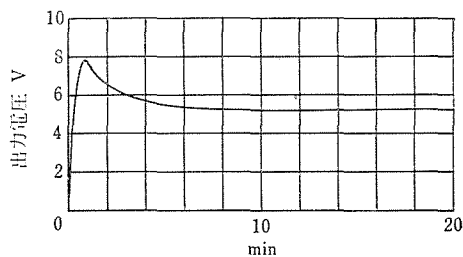


図2 関数円筒と回転体



(c) PV52の光感度分布



(d) PV52のステップ応答

図3 光電管 PV52 の特性

ことにした.

### (1) PV52 光電面の種類

光電面はその構造から、透過光を用いる半透明光電面と、厚膜とよばれる不透明なものに分けることができる. 現在実用化されている光電面はほとんどがP形半導体で、その分光特性は光電面として用いられる金属の種類やガラスの分光透過率特性によって異なったものとなり、使用した PV52 の光電面は半透明・マルチアルカリ (Sb-Na-K-Cs) の面である.

### (2) PV52 の特徴および仕様

PV52 は真空光電管で、陽極電流の飽和点以上のところでは、電圧の変動による影響が小さく、感度は高い周波数まで一定であり、出力は入射光量に正しく比例する.

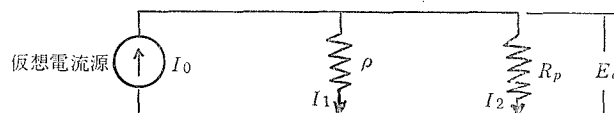
形状は頭部窓形の可視域用で、特に 550~660nm の光に対して良好な感度を示し、暗電流がすくない.

最大陽極電圧 250V, 最大暗電流  $0.005\mu\text{A}$

最大周囲温度  $50^{\circ}\text{C}$ , 最小感度  $80\mu\text{A}/\text{lm}$

### (3) 光電変換系の動作について

光電変換系の等価回路は次のようになる.



$J$ : 光量,  $I_0$ : 陽極電流,  $V_{dc}$ : 陽極電圧,  $R_p$ : 負荷抵抗,  $E_0$ : 出力電圧 としてこの回路について計算すると,

$$\partial V_{dc}/\partial I = \rho = \text{管内部抵抗} \simeq \infty$$

$$I_0 = \tan\theta J \quad (\theta \text{ は } I_0 \sim J \text{ 特性曲線の傾角})$$

然るに,  $I_1 = E_0/\rho$ ,  $I_2 = E_0/R_p$  であるから

$$\tan\theta J = I_0 = E_0/\rho + E_0/R_p = (1/\rho + 1/R_p)E_0$$

これより,  $E_0 = \tan\theta(1/\rho + 1/R_p)^{-1}J$  ここで  $1/\rho \simeq 0$  であるから  $E_0 = R_p \tan\theta J$  となり, 入射光量  $J$  に比例した値となる.

外部演算増巾器あるいは指示器に接続した場合その入力インピーダンスを  $R_i$  とすれば, 同様に  $E_0 = (1/\rho + 1/R_p + 1/R_i)^{-1} \tan\theta J \simeq R_i \tan\theta J_0$ .

従って  $I_0$  の直線限界値は図3より  $12\mu\text{A}$  であるから, 光電管回路, 演算増巾器の雑音電圧や直線性最低入力等で定まる最低レベル電圧を  $E_{\min}$  とすれば,  $R_{i\min} \geq E_{\min}/12\mu\text{A}$  となる. 筆者の実験によれば,  $R_i = 100\text{K}\Omega$ , および  $10\text{K}\Omega$  に対し,  $E_{\min}$  を多めに見積って数百  $\mu\text{V}$  の演算増巾器を使った範囲では  $R_{i\min} \simeq 50\Omega$  となるので, 光電管の出力を直接アナコンの入力としても直線性の保たれる充分の範囲であり差支えはなかった.

なお, 較正をする場合に都合のよいよう零点調整回路を附加したが, アナコンには当然負電圧源があるからこれは省いてもよい.

### 3.5 出力指示部および記録器

本測定の観測と記録に使用した装置の主なる要目は、つぎのとおりである。

(1) シンクロスコープ

I 社製 SS-5101, 感度  $0.05 \sim 20 \text{ V/cm}$ , DC $\sim 10 \text{ Mc}$ -3db, 立上り時間  $40 \text{ m}\mu\text{sec}$ , 入力インピーダンス  $1 \text{ M}\Omega$

(2) XYレコーダ

R 社製 F-42型, 測定電圧  $2 \text{ mV} \sim 100 \text{ V}$ , 確度  $\pm 0.4\%$  (直線性  $\pm 0.2\%$ ), 追従速度  $1 \text{ sec}$

#### 4. 装置の検定と特性

まず関数曲線を切り抜いた黒紙を貼る前に, 関数円筒を回転部にさしこみ光帯を照射して駆動し, ブラウン管上で観測し, 雑音の許用基準として感度  $0.2 \text{ V/cm}$ , 螢光点直径  $0.3 \text{ mm}$  で全輝線巾  $1.0 \text{ mm}$  程度以下のものについて取捨選択する. 然る後円筒縦方向の輝度むら, 反射むらなどを調べるため, 図 4 に観測結果が示されているような階段波形を用いて, 各段の縦, 横が揃うよう光学系の調整と円筒面の良否を撰択する. 従ってこの階段波形はこの装置の校正波形として使用するため, 紙の切抜寸法は精度に注意して特に正確に行う必要がある. この装置では機械工作の精度上, 円筒面の偏心回転のため反射光束が光電管光電面上でゆらぐことを避け難く, 従ってこれが雑音の有力な原因となることを予想したが, 光電面の一様性特性の良好のためとレンズ  $L_3$ ,  $L_4$  を使用して部分照射を避けたことによって, 円筒外周上の偏心  $0.2 \text{ mm}$  程度ならばノイズの原因にはならなかった. この故に機械系の設計および工作については, 円筒鏡面の良否のむらを除いて, 過大な配慮をする必要がなかった.

以上の過程を経て撰択した円筒に, 所要の関数を与える曲線を切り抜いた黒紙を貼りつけるのであるが, 回転体にさしこむ際指先で鏡面を汚すことのないよう, 紙の部分が上になるようにしておく (図 5 参照). 紙の切り抜きは慣れると手早く正確にできるようになる. 安定性実験によれば, 1 時間の連続作動で上向きシフトは  $0.4 \text{ mm}$  以下であった. このように安定性のよいことはアナコン演算をする場合, 誤差を少なくする上で有利なことである. 室内の照明は光雷管に光の直射のない限り, 演算操作が行なえる程度の明るさでも,

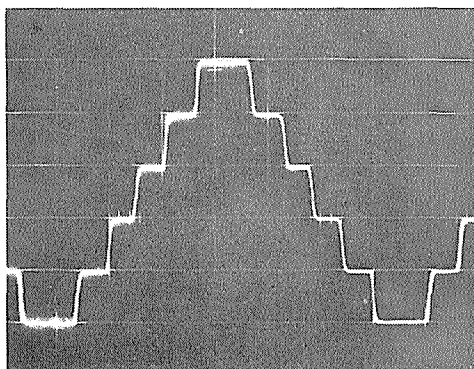


図 4 階段波形の観測結果

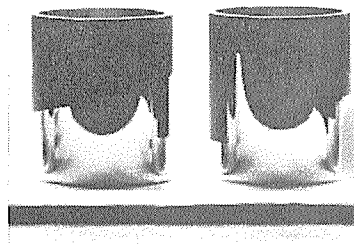
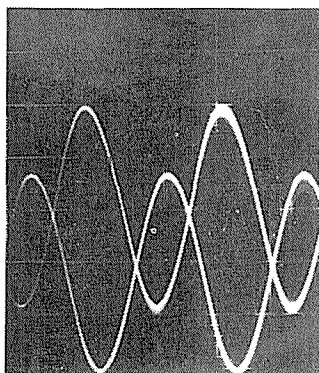
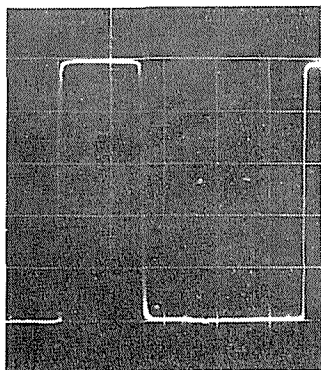


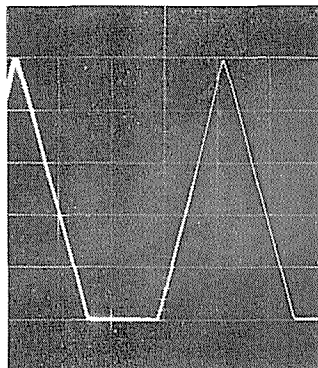
図 5 関数曲線の黒紙を貼った関数円筒



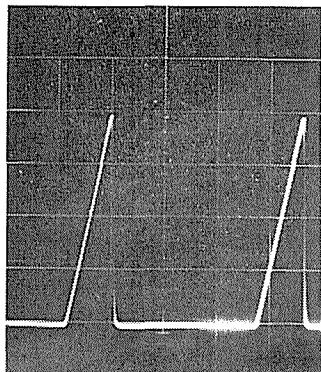
(a)  $\sin \theta$  (上は本方式, 下は発振器より)



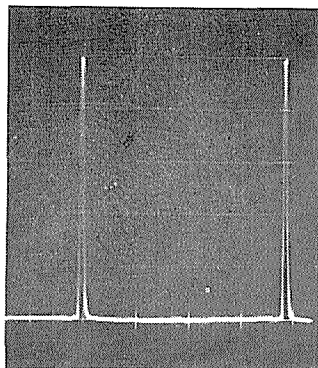
(b) 矩形波



(c) 三角波



(d) のこぎり波



(e) インパルス波

図6 関数発生器で得た各種アナログ電圧波形

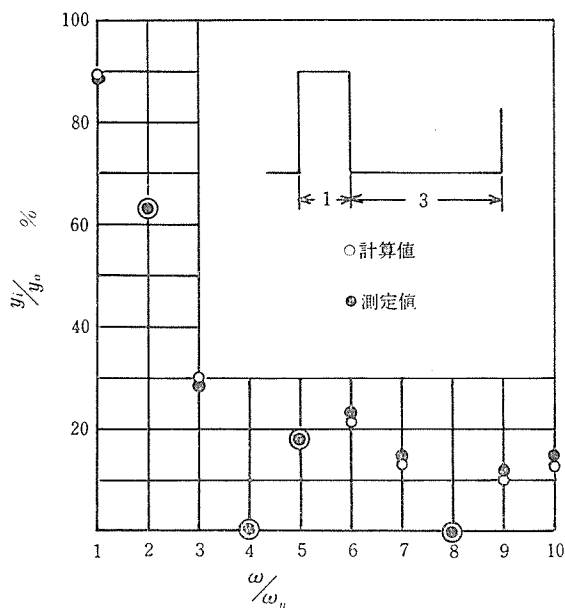


図 7a 矩形波の分析結果

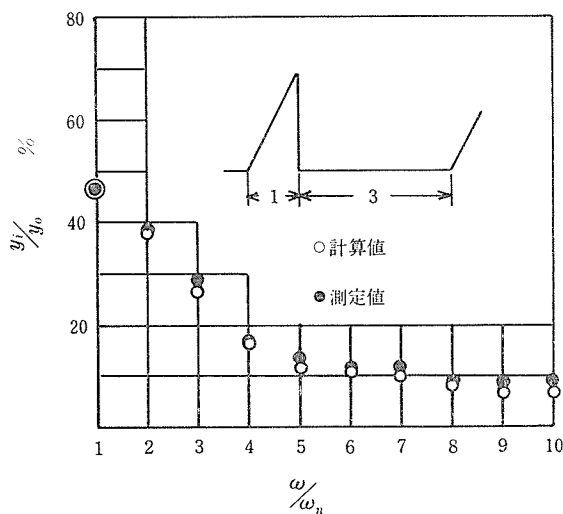


図 7b のこぎり波の分析結果

結果には差支えなかった。

シミュレートした波形の例と、これらの波形をスペクトル分析した例を図6，図7に示す。これによれば一次（30Hz）の精度は約0.5%である。高次になるに従ってノイズの影響と成分絶対値が小さくなるため当然精度は低下するが、アナコン演算の場合、高次程その影響は少くなるから、実用に供し得る精度とみなしてよい。

## 5. 機械振動系への応用

### 5.1 一般外力による運動—過渡振動

振動系  $m$ ,  $c$ ,  $k$  に任意の外力  $F(t)$  の作用する場合, 運動の方程式は,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

この方程式を  $\ddot{x} + 2\varepsilon\dot{x} + \omega_0 x = f(t)$  とおけばこの式の一般解は, 次のようになる.  
初期条件として,

$$t = 0 \text{ で } x = x_0, \dot{x} = v_0 \text{ とすれば}$$

$$x = e^{-\varepsilon t} \left\{ x_0 \cos \omega_n t + \frac{v_0 + \varepsilon x_0}{\omega_n} \sin \omega_n t \right\} + \frac{1}{m v_0} \int_0^t F(\tau) e^{-\varepsilon(t-\tau)} \sin \omega_n(t-\tau) d\tau$$

(a) これに対するモデルおよびブロック線図は, 図 8a, 図 8b に示すようになり, 外力  $F(t)$  の一例としてのこぎり衝撃波をあたへ,  $2\varepsilon$  をパラメータとした場合の演算結果を示せば, 図 8c の如くなる.

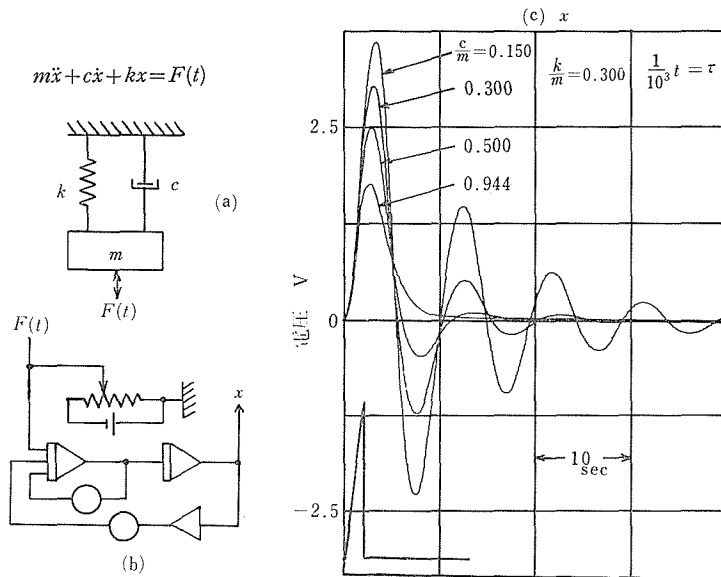


図8 のこぎり波による過渡振動

(b) 路面プロファイルによる過渡振動およびこれに関連するテーマについては従来多くの研究が発表されている<sup>4), 5), 6), 7)</sup>.

ここでは一例として図 9a に示すような基礎的モデルの場合について適用すると, 運動の方程式は

$$m_1 \ddot{x}_1 - c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1(x_1 - x) - k_2(x_2 - x_1) = 0$$



$$m_2 \ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0$$

となり、これに対するブロック線図は図9bのように示される。式中  $x = f(\omega t)$  の曲線波形としてのこぎり波を与えて演算すると、図10、図11、図12が得られ  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $c$  の影響が直視的に解析される。これを更に応用して非線形の  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $c$  に対し実際の路面プロフィール<sup>8)</sup>を用いて演算すれば、車体の過渡振動におよぼす各要素の影響についての解析を行うことができる。

## 5.2 周期的一般外力による周期振動

一般の外力がかなり複雑でも周期的であればこれをフーリエ級数に展開できるから、もし運動の方程式が線型であればそれぞれの項に対する応答を求め、その結果を重ね合わせて解を求めることができるが、ここでは関数発生器を用いて機関軸系の振り振動の解析に

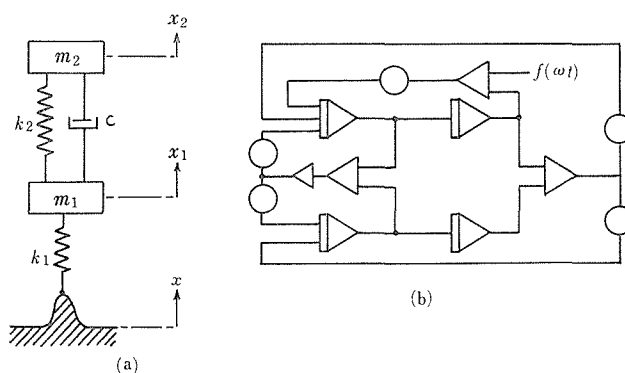


図9 路面プロフィールによる外力が加えられる振動系モデルと演算ブロックダイアグラム

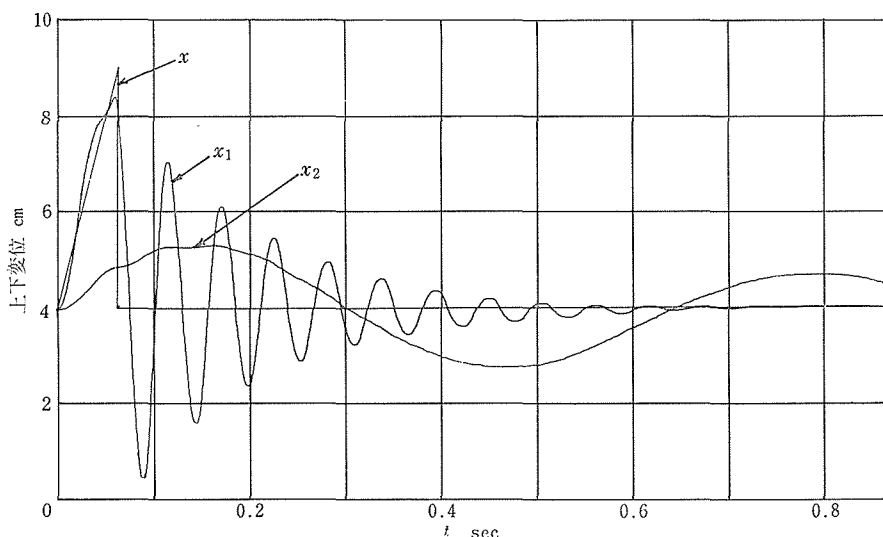


図10 のこぎり波による過渡振動 (I)

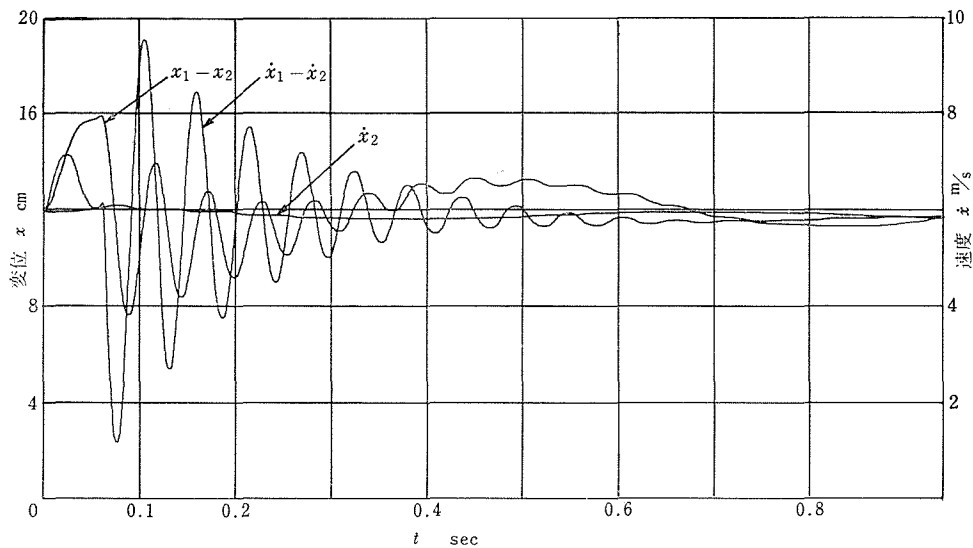


図11 のこぎり波による過渡振動 (II)

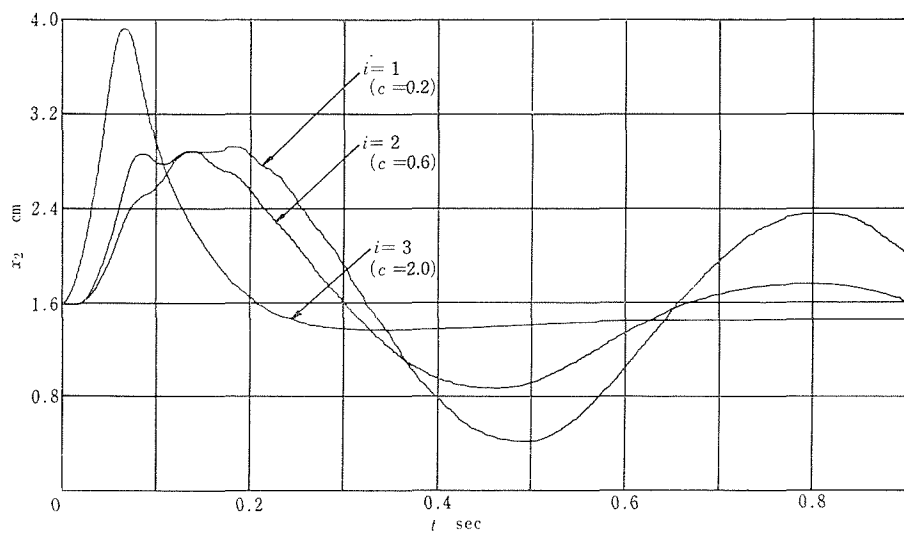


図12 のこぎり波による過渡振動 (III)

応用した一例をとりあげてみよう。

一般にクランク軸に加えられる強制トルクは次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 Q &= \text{ガス圧トルク} + \text{慣性トルク} \\
 &= F_g r f(\theta) + F_i r f'(\theta) \\
 &= Q_n + Q' \\
 &= Q_0 + \sum Q_i \sin(i\theta + \varphi_i) + m' r \omega^2 \sum D_n \sin n\theta
 \end{aligned}$$

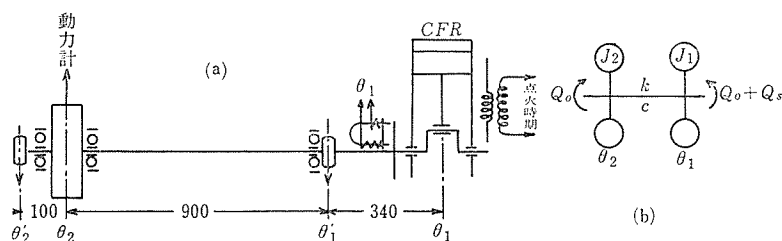


図13 CFR機関による実験装置

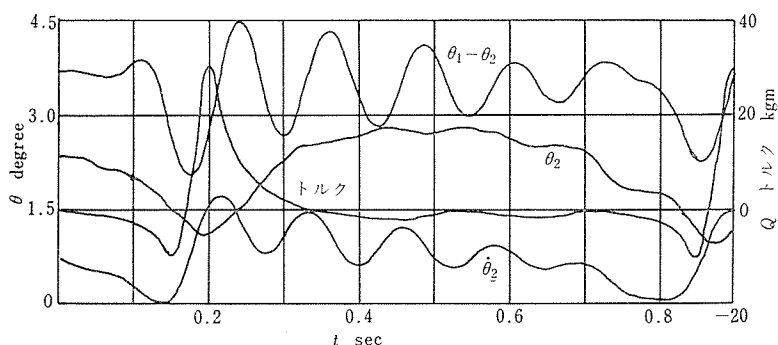


図14 CFR機関軸系の演算結果

最後の式中の第3項は慣性トルクを示し回転数が高い場合には問題になるが、低速の場合は省略できる。筆者はさきに、CFR機関に図13aに示すような試験軸をとりつけ、試作した容量変換型の振り振動計を用いて、この軸系の振り振動およびばみ車の速度変動の状態を測定した<sup>9)</sup>。この軸系のモデル(図13b)に対する方程式は

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + c(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + k(\theta_1 - \theta_2) = Q_s$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 - c(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - k(\theta_1 - \theta_2) = 0$$

$$\text{ここで} \quad Q_s = Q - Q_0 = \sum Q_i \sin(i\theta + \varphi_i) + m' r \omega^2 \sum D_n \sin n\theta$$

従って、運転条件に応じたトルク曲線波形が適当な方法で求められてある場合、4ストロークサイクルの平均トルクを与える  $Q_0$  を

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} (Q - Q_0) d\theta = 0$$

となるようアナコンを用いて求めるならば  $Q - Q_0 = Q_s$  より  $Q_s$  が得られるから、この  $Q_s$  を関数発生機にいれることによって演算ができる。トルク波形の一般的一例についてこのようにして演算した結果を図14に示した。

なおここで、単に振り振動のみについて演算すれば事足りるといふ場合には

$$\theta = \theta_2 - \theta_1, \quad \frac{1}{J} = \frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} = \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} \quad \text{とおけば}$$

$$\ddot{\theta} + \frac{c}{J} \dot{\theta} + \frac{k}{J} \theta + \frac{Q_s}{J_1} = 0$$

となり、演算要素は少なくて済む。

## 6. む す び

以上述べた点について要約すれば、この関数発生器には次のような特徴がある。

- (1) 本方式は、簡単な機械系と光学系によって任意関数のアナログ電圧を発生させることができる万能型ともいえるものであるから、演算要素の利用度がよい。
- (2) 光電変換方式であるので応答速度の範囲が広い。従って重要な波形としてよく知られている単位インパルス波は、直接アナコンで発生することはできないが、本発生器によれば容易である。
- (3) 得られた波形の原曲線に対する精度は約 0.5% とかなりよいので、現象の数式化の際の仮定を考慮にいれるならば、実際の現象を解析するに充分利用できる程度である。
- (4) 関数発生器の出力を積分するプログラムの場合、ドリフトは誤差を大きくする原因となり好ましくないが、本方式の回路は簡単で、光電管の特性からも充分安定で、光源電圧の降下のないよう注意をするならば、ドリフトは 15mV/h 程度であった。また X-Y レコーダによる記録の観測によればヒステリシスも極めて少ない。
- (5) 実際にこの装置を用いて演算する場合、あるプログラムについてあらかじめ設定した数種の関数曲線紙を貼った関数円筒をさしかえる操作のみによって多量の演算を容易に行うことができる。

結言すれば、これらの特徴を利用することによって、応用例にもあげたように、機関の動力特性、自動車の走行特性などの機械振動系や運動系の解析に際して充分利用効果があるものと期待している。当面筆者としては衝突の問題の基礎的研究、非線形への応用などを企図している。

## 7. 付 記

(1) 本方式の原理構成は既述のように、回転関数円筒鏡面を反射面とする光学系が主要部の一部となっているので、光学系の設定と調整に実用上稍煩わしい点があり、また装置全体のコンパクト化という点が問題を生ずる因ともなっている。このために後述のような改良型を設計して、現在試作実験中である。

(2) 本方式は関数値を光帯でスプリットしているが、連続的に行っているので取出し信号は連続値である。即ち本質的にはアナログ方式であって、これはアナコン用関数発生器として考えられたことから当然のことである。しかし本方式は極めて容易に且つ効率よくデジタル方式に変換可能である。すなわち、光路の途中適当なところに光束断続器たとえ

ばロータリイセクタを挿入するか、あるいは光源輝度変調するかの方法を用いればよい。このことについては現在検討中である。

(3) 関数円筒を光透過率のよい材料で作成し、透過光量を関数値に比例させる方式についても考え、当初ガラスを用いて試みたが加工の点で問題がありよい結果が得られなかった。最近の樹脂材料の進歩により加工性、光学的性質の良い材料が得られるようになったので、再びこれを取りあげ、コンタクトレンズなどにも用いられるメタクリル樹脂（測定したデータによれば白色透過率は93%である）で試作実験中であり、これにより本装置は光学系を非常に簡略化したコンパクトで取扱容易なものとなると考えている。

おわりに、本研究に御鞭撻を戴いた加藤良雄教授、終始御指導と御援助を戴いた松山潔教授、御協力を惜しまなかった羽田太市技官の諸氏に対し深く謝意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 藤田：アナログ電子計算機のプログラム，昭42年，昭光堂，p.97.
- 2) 田向：万能関数発生器，横河技報，Vol. 16, No. 1, '72.
- 3) 三浦・阿部：フォトホーマの誤差に関する資料，電学誌，78巻，833号，1958，p.34
- 4) 亘理：自動車の振動および乗心地試験法，日本機械学会第179回講習会教材。自動車の振動，騒音と乗心地，同上第247回講習会教材。
- 5) 橋倉・杉本・桜井：ショックアブソーバの減衰力特性が車体振動におよぼす影響について，自動車技術，Vol. 10, No. 6, 1956. Vol. 11, No. 7, 1957.
- 6) 山本・島田：障害板対称乗越しによる自動車の過渡振動について，自動車技術，Vol. 11, No. 10, 1957～ Vol. 15, No. 7, 1961. 連続走行波路による自動車の運動，自動車技術，Vol. 13, No. 7, 1959.
- 7) 海出・岡田・小野：ショックアブソーバの形式と車体振動について，自動車技術，Vol. 14, No. 4, 1960.
- 8) 森田・田代：路面プロフィルの研究，自動車技術，Vol. 24, No. 4, 1970.
- 9) 山口：容量型振り振動計の特性とその応用，信州大学工学部紀要，No. 24, 1968.

### Summary

#### On the Characteristics of a Function Generator Converted Photoelectrically

Tsutomu YAMAGUCHI

(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

A new type of analog voltage generator is proposed and tested. An optical strip is projected upon a mirror surface cylinder with a function paper stuck on it and the reflected light is converted to voltage photoelectrically in proportion to the function curve.

As a result of trials and considerations, a simple apparatus which can be put to practical use with satisfactory accuracy and reliability is produced.

In this report its principle and construction are fully explained, and features of the systems are also shown as listed below.

(1) Since this system can generate voltage mechanically and optically by a simple device, the utility of operation element is largely extended.

(2) A photoelectrical conversion system has a wide limit of the response speed. While a unit impulse wave is impossible to be converted directly by an analog computer, it can be easily reproduced by this generator.

(3) The accuracy of the wave form obtained by the generator is about 0.5 % for the original curve, and is usually sufficient for the analysis of actual events.

(4) As the circuit of this system is simple and the characteristics of the phototube is very stable, the drift is quite small. From observations of the records of an X-Y recorder, hysteresis is also found to be very slight.

(5) In practice, a large quantity of calculations can be easily performed by replacing function cylinders which are prepared previously after experimental data.

In conclusion, these characteristics make it possible to calculate examples from elementary analysis of mechanical events in the field of engine and automobile engineering.