

回転速度変動の無接触測定装置

江守 一郎・横山 茂士・斎藤 治彦

自動車の自動変速機に併用されるターボ式流体伝動装置の振動特性を解析する場合、軸の回転速度変動を測定する必要にせまられた。回転速度変動が微小で、しかも、1 回転について 1 回、または、それ以上の早いものを測定することは比較的困難である。そこで、圧電式加速度計をトランスデューサとして用い、FM 送信機を回転軸中に組み込んで、信号をテレメータする方法を開発した。

1. ま え が き

回転機械の非正常運動を研究する場合に、回転速度変動を、正確に測定する必要があることが多い。従来用いられている測定方法として、次のものがあげられる。

(1) 小型発電機による方法 これは、回転軸に小型発電機を結合し、発電機の発生する電流を記録する方法である。この方法は構造が簡単で、安価ではあるが、回転速度変動の周波数が高い場合には、電気的ならびに機械的問題に起因して、測定値が不正確になる。

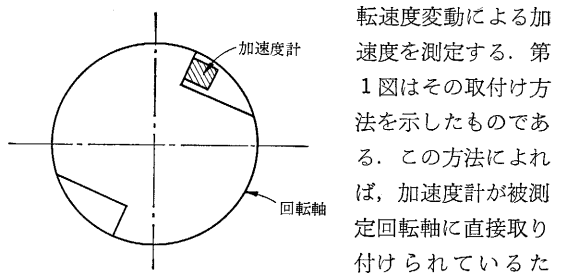
(2) 電磁式ピック・アップによる方法 これは、回転軸に歯車を取り付け、電磁式ピック・アップをそれに接近しておく方法である。軸の回転によって、歯形が電磁式ピック・アップの作る磁界を切り、そのため誘導電圧が発生する。この電圧の変化を記録することによって、回転速度変動が測定される。その場合、電圧変化をそのまま記録するアナログ方式と、電圧変化をパルス信号に変換し、パルス間の時間を測定するデジタル方式とがある。デジタル方式は、回転速度の変動の読取りが容易で、精度の高い利点をもっているが、その反面、装置が大きく、また、高価になる欠点をもっている。これに対して、アナログ方式は、安価ではあるが、精度が低く、微小な変動の測定には不適當である。

(3) 光電式ピック・アップによる方法 これは、回転軸にスリット付の円板を取り付け、スリットを通る光を光電式ピック・アップを用いて、パルス信号に変換し、パルス間の時間を測定するデジタル方式である。この方法は、(2)のデジタル方式と同じ利点と欠点をもつ。

(2)と(3)の方法に共通な問題として、ピック・アップの取付け部に振動が伝わると、それが大きな誤差の原因になる。また、歯車を使用する場合には、回転時における歯車の外周とピック・アップの間の隙間を一定に保持することや、歯形のピッチならびに形状誤差をできるだけ小さくすることが必要であり、スリット円板を使用する場合には、スリットのピッチ誤差が生じないように、スリット付円板の製作および装置の組付けに十分な注意を払う必要がある。

上述のように、従来の測定方法には精度上または取扱いに種々な問題が存在する。筆者らは、流体トルクコ

ンバータ（以下トルクコンバータと略記）の振動特性の研究過程において、回転速度変動を正確に測定する必要にせまれ、ここに、従来の方法より精度を上げ、しかも、取付け方法も簡単な加速度計による測定方法を開発し、その実用性を確認することができた。この方法では、



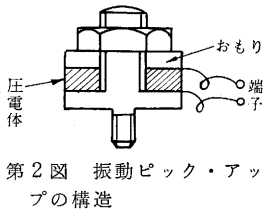
加速度計を回転軸の半径方向に対し直角に取り付け、回転速度変動による加速度を測定する。第 1 図はその取付け方法を示したものである。この方法によれば、加速度計が被測定回転軸に直接取り付けられているため、軸の周囲が回転や振動をしている場合でも、特別な静止部分を作る必要がなく、したがって、容易に、直接測定できる利点をもつ。筆者らが実験したトルクコンバータの入力軸は 500～1,500 rpm の範囲の回転数で回転しているため、加速度計に大きな遠心力が加わるので、加速度計としては、小型、堅牢であることが必要とされる。そのため、ピエゾ効果を利用した加速度計振動ピック・アップ PV-06(リオンKK製)を用いた。これは小型、堅牢で、機械的な運動部分がなく、測定可能範囲が広く、感度の高いという特長を持っているので、他の方法では困難な微小変動の測定が可能である。振動ピック・アップによる信号は非常に小さいので、その信号をそのままスリップ・リングを用いて外部に取り出すと、スリップ・リングの接触抵抗による雑音のため、正確な測定が困難となる。そこで、伝送方法として、有線によらず、無線テレメータリングによる方法を試みた。

このような、無線テレメータリングによる無接触測定は、回転速度変動の測定以外にも、その応用範囲が広く、今後ますます発展するものと思われる。無線テレメータリングの装置としては、構造が小型、軽量、簡単で、信頼性の高いことが望まれる。この観点から、周波数変調方式による、十分実用に供せられる小型送信機を開発した。

以下、これら新しく開発された振動ピック・アップと、無線テレメタリングの組合せによる回転速度変動測定装置について詳述する。

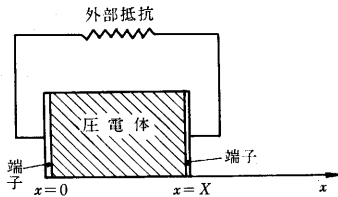
2. 振動ピック・アップ

ピエゾ効果は 1880 年にキュリー兄弟により実験的に発見されたものである。水晶に応力を加えると、応力に比例した電荷がその表面に生じる。この逆の効果、すなわち、電界を加えたときにひずみを生ずることは 1881 年にリップマンにより理論的に予言され、キュリーにより証明された。その後、これらの効果を利用したマイクロホン、スピーカ、発振器、蓄電機のピック・アップなどが開発されている。現在では水晶のような天然材料のほかに、チタン酸バリウム、ジルコン酸鉛も広く用いられている。この実験で



第2図 振動ピック・アップの構造

用いた圧電体はジルコン酸鉛で無応力状態での電気容量が約 1,000 pF 程度の小容量のものである。振動ピック・アップの構造を第2図に示す。おもりに加速度が加わると、その慣性力に比例した応力変化が圧電体に伝わり、



第3図 圧電体回路

相互関係を求めるため、第3図に示すように、圧電体を簡単に一次元と考えて解析する。

圧電体の単位体積にたくわえられるエネルギー W は、圧電体に加えられる応力を σ 、電界を E とすれば、

$$W = (1/2)(\sigma^2/Y_E) + \xi \sigma E + (1/2)\epsilon_e E^2 \quad (1)$$

で与えられる。ここに、 Y_E は電界が加っていない場合、すなわち、閉回路にした場合の弾性係数、 ξ はピエゾひずみ係数、 ϵ_e は無応力状態での圧電体の透電率である。ひずみ e は一定電界 E のもとで、エネルギー W の応力に対する増加割合、また電束密度 D は一定応力 σ のもとでエネルギー W の電界に対する増加割合であるから、

$$e = (\partial W / \partial \sigma)_E = (\sigma / Y_E) + \xi E \quad (2)$$

$$D = (\partial W / \partial E)_\sigma = \xi \sigma + \epsilon_e E \quad (3)$$

となる。ここで注意を要するのは、応力により透電率、電気容量が変化し、電界により弾性係数が変化するので、いかなる状況においてそれらが測定されたものかを確認する必要があることである。(3)式より、

$$E = (D - \xi \sigma) / \epsilon_e \quad (4)$$

$x=0$ における電極の電子密度を η_f とすれば、圧電体の内部では自由電子は存在しないから、 $0 \leq x \leq X$ で D

は一定値 $(-\eta_f)$ をとる。 $x=0$ に対する $x=X$ の電位を v とすれば、

$$v = - \int_0^X E dx = (\eta_f + \xi \sigma) X / \epsilon_e \quad (5)$$

となる。ここに、 X は圧電体の厚みで、応力や電界をかければ圧電体にひずみが生じ、応力も電界もかかっていない場合の厚み X_0 から変化する。(5)式を時間で微分すれば、

$$dv/dt = (X/\epsilon_e)(d\eta_f/dt) + (\eta_f/\epsilon_e)(dX/dt) + (\xi X/\epsilon_e)(d\sigma/dt) + (\xi \sigma/\epsilon_e)(dX/dt) \quad (6)$$

を得る。ここに、 X の変化は η_f や σ の変化に比べて非常に小さいので、 $X \approx X_0$ と近似すれば、

$$dv/dt = (X_0/\epsilon_e)(d\eta_f/dt) + (\xi X_0/\epsilon_e)(d\sigma/dt) \quad (7)$$

となる。一方、外部負荷を簡単に抵抗 R のみと考え、圧電体の断面積を A とすれば、

$$v = -Rd(A\eta_f)/dt \quad (8)$$

となる。(7)(8)式から η_f を消去すれば、電位 v と応力 σ に関する微分方程式として、

$$dv/dt + (X_0/\epsilon_e RA)v = (\xi X_0/\epsilon_e)(d\sigma/dt) \quad (9)$$

をうる。 $\epsilon_e A/X_0$ は無応力状態の電気容量 C_e である。 $C_e R = t_0$ とおけば、 t_0 は電気容量 C_e と抵抗 R により形成される電気回路の時定数である。圧電体に外部より加わる応力変化の周波数 f が $1/(2\pi t_0)$ より十分に大きい範囲では、近似的に $|\sigma/v| = \epsilon_e/(\xi X_0)$ となる。

圧電体についているおもりの質量を M 、加速度を α とすれば、 $\sigma = Ma/A$ であるから、

$$|\alpha/v| = \epsilon_e A/(\xi X_0 M) \quad (10)$$

となる。ここに、 $\epsilon_e A/(\xi X_0 M) = k$ とすると、 k は振動ピック・アップにより定まる定数である。測定すべき回転速度変動の周波数に対して $1/(2\pi t_0)$ が十分に小さくなるように適当な設計をおこなえば $|\alpha/v|$ は測定範囲において一定値 k をとる。

回転速度変動の周波数を f 、振動率を ϵ 、平均回転角速度を ω_0 とすれば、回転角速度 ω は

$$\omega = (1 + \epsilon \cos 2\pi f t) \omega_0 \quad (11)$$

となる。振動ピック・アップの取付け半径を r とすれば、加速度計に加わる周方向の加速度 α は、

$$\alpha = d(r\omega)/dt = -2\pi f r \epsilon \omega_0 \sin 2\pi f t \quad (12)$$

となる。したがって、

$$k = |\alpha/v| = |2\pi f r \epsilon \omega_0/v| \quad (13)$$

となり、検定により k の値を求めておけば、 ω_0 、 f 、 $|v|$ を測定することにより、回転速度変動の振幅を求めることができる。

3. 無線テレメータ送信機

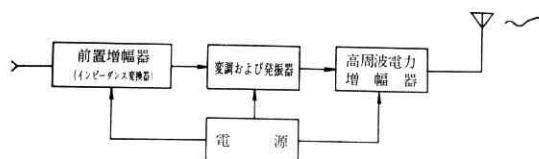
すでに述べたように、無線テレメタリングは応用範囲が広いので、送信機の選択にあたっては、おのおの場合についてトランスデューサとの関係、あるいは、測定条件などに十分考慮を払わなければならない。本実験

第 1 表

測定条件	送信機の仕様
送信機を軸中に組み込む	送信機の高さ 190×28 ^φ
加速度の最大値 7 G	信号の大きさの最大値 60mV
変動の周波数 15~50 c/s	信号帯域 15~50 c/s
	送信周波数 85~90 Mc/s
	受信電界強度 距離 10m にて 3 μ V

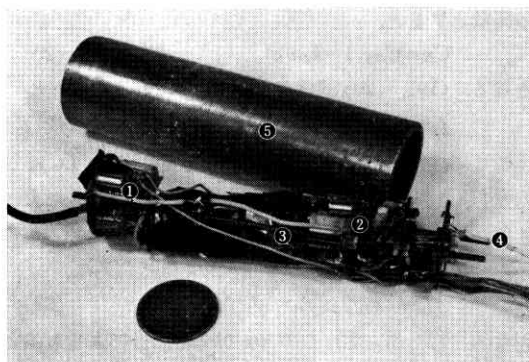
の測定条件および送信機の仕様を第 1 表に示す。

送信機のブロック図を第 4 図に示す。振動ピック・アップからの電気信号は、高入力インピーダンスの前置増



第 4 図 テレメータ送信機のブロック図

幅器で、インピーダンス変換されたのち、変調器に入る。変調方式として、周波数変調を採用したが、この変調方式は伝送中の雑音の影響を受けにくく、信号の多重化が容易である等の利点がある。さらに、発振器の発振周波数が送信アンテナの周囲状況による影響を受けにくくするため、信号を高周波電力増幅器に通したのち、アンテナから送信する。送信機の写真を第 5 図に示す。



①前置増幅器 ②変調および発振器 ③電池 ④アンテナ
⑤ケース

第 5 図 テレメータ送信機

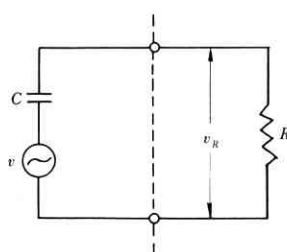
次に各ブロックについて説明する。

(1) 前置増幅器(インピーダンス変換器) 振動ピック・アップの項における解析で明らかのように、振動ピック・アップはコンデンサ C_s と信号源で置換して考えることができる。振動ピック・アップと前置増幅器の電気回路を第 6 図に示すように、直列に結合されたコンデンサ C_s 、信号源 v 、抵抗 R の等価回路に置換して考える。この場合、入力回路の抵抗 R の端子電圧 v_R は信号の周波数を f_s とすると、

$$v_R = v / \sqrt{1 + (f_{s0}/f_s)^2} \quad (14)$$

ただし、 $f_{s0} = 1/(2\pi C_s R)$

(15)



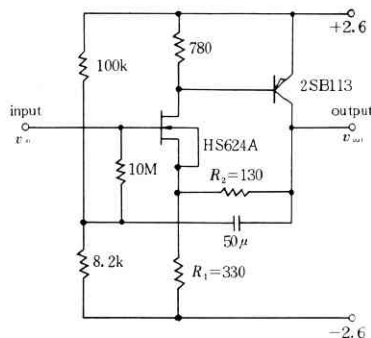
第 6 図 ピエゾピック・アップの等価回路と入力抵抗

となる。したがって、低い周波数まで一定出力をうけるには、時定数 $C_s R$ を大きくとらなければならない。容量 C_s を大きくするためには、振動ピック・アップ自体を大きくしなくてはならない。

ピック・アップは回転軸に取り付けられるので、

スペースに限度があり、時定数を大きくするには入力抵抗 R の方を大きくする必要がある。すなわち、本実験で使用する振動ピック・アップの容量 C_s は約 1,000 pF であるから、信号の下限周波数を 2 c/s として、(15) 式より計算すれば前置増幅器の入力は約 100 M Ω と非常に高いインピーダンスでなければならない。

従来、このような高入力インピーダンスの回路はトランジスタでは無理とされ、真空管を使用していたが、本テレメータ送信機としては、小型、軽量、耐震性、低消費電力という点から半導体素子の使用が望まれた。最近実用化された電界効果トランジスタは従来のトランジスタが電流制御形であるのに対し、真空管と同様に電圧制御形であるので、入力の直流抵抗は非常に高く、特に絶縁ゲート形電界効果トランジスタ (Metal Oxide Semiconductor Type Field Effect Transistor, 以下 MOS 形 FET と略記) では $10^{15}\Omega$ であり、真空管に匹敵する。また、静特性も 5 極真空管と良く類似しているため、手軽に真空管と置換でき、半導体素子としての利点をかねそなえているので、トランジスタ以上に今後の期待が大きい。



第 7 図 前置増幅回路

そこで、本テレメータ送信機では第 7 図に示すような MOS 形 FET による高入力インピーダンス回路を前置増幅器とした。ただし、後述するように発振回路の変調特性がピック・アップの出力信号そのままでも十分なので、前置増幅器は、電圧利得 1 の高入力のインピーダンス変換回路である。回路は第 7 図に示すように、抵抗 R_1, R_2

による負帰還回路であり、その入出力の電圧関係は、

$$v_{out} = \frac{1 + (R_2/R_1)}{1 + (g_{DS}/g_m)} v_{in} \quad (16)$$

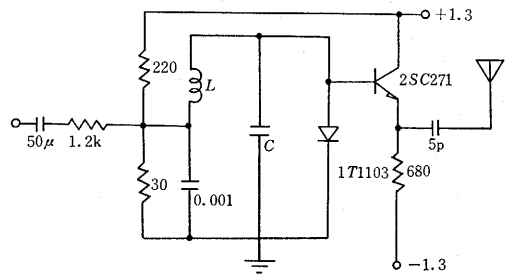
で与えられる。したがって、電圧利得を1にするために、FETの V_{SD} (SourceとDrain間の電圧)を高くとることができるときには、 g_{DS}/g_m が省略できるので、 R_2 を零とするだけでよいが、いまの場合、電源の制約から V_{SD} が比較的低く、 $g_{DS}/g_m = R_2/R_1$ としなければならない。このとき、入力インピーダンス R_{in} は

$$R_{in} = \frac{1}{1 - (v_{out}/v_{in})} R_g = \frac{1 + (R_2/R_1)}{(R_2/R_1) - (g_{DS}/g_m)} R_g \quad (17)$$

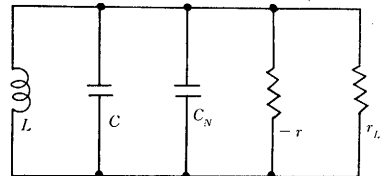
となり、非常に高くなる。(16)、(17)式からわかるように、入出力特性や入力インピーダンスが g_{DS}/g_m の変動による影響を受けるので好ましくないが、実用上その影響はほとんど問題にならない程度であり、また、全体の構成も比較的簡単となるので、これを前置増幅器として用いた。回路の動作は安定で、直線性、ひずみ率とも100 mVまで良好であり、また、入力信号として0.2 mVまで出力側で判別可能であるので、本振動ピック・アップの感度(1 Gで約10 mV, Gは重力の加速度)からすると、約0.02 Gまで測定可能である。この入力インピーダンスの正確な測定は、非常にインピーダンスが高いのでむずかしいが、ここでは、第5図に示した振動ピック・アップの等価回路と同様、入力に容量のわかったコンデンサを直列に挿入し、信号の周波数を変えて周波数特性の折点を測定し、計算で入力インピーダンスを求めた。計算の結果は目標値より十分高く150 M Ω 以上であった。

時定数 $C_e R$ を大きくするための別の方法として、回路方式により振動ピック・アップの容量を等価的に大きくする方法がある。この回路方式は前置増幅器の入力として、それほど高入力インピーダンスでなくてもよいから、誘導などによる雑音の混入が少なく、すぐれているが、本実験では振動ピック・アップの構造上の理由で用いられなかった。

(2) 変調および発振器 本送信機の発振器は軸中に組み込むため、小型でなければならないが、そのほか、発振周波数が機械的振動やアンテナの周囲状況によって変動しないこと、電源電圧による周波数のドリフトが少ないことが重要な問題となる。小型発振器として、トンネルダイオードの負性抵抗を利用する発振を用いた。この発振は第8図に示すように、トンネルダイオードと L 、 C 共振回路によるもので、その等価回路を第9図に示す。ただし、 C_N はトンネルダイオードの接合容量、 $-r$ はトンネルダイオードの負性抵抗、 r_L は次段の入力インピーダンスを含めての共振時の回路の損失抵抗である。このときの発振条件は負性抵抗の電力発生が共振時における回路の損失を補償し、発振を持続させるもので



第8図 変調および発振回路と高周波増幅回路



第9図 発振器の等価回路

あるから、

$$r_L \geq |-r| \quad (18)$$

で与えられる。また、発振周波数 f_0 は、

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{L(C+C_N)} \quad (19)$$

となる。

次に変調について考えてみると、負性抵抗領域での接合容量 C_N はバイアス電圧の増加とともに減少するので、これを基準バイアス電圧からの変化電圧 v_B の一次の関数とすると、

$$C_N = C_{N0}(1 - k_D v_B) \quad (20)$$

となる。(19)、(20)式より発振周波数 f_0 は、

$$f_0 = f_{00}/\sqrt{1 - k_D(f_{00}/f_N)^2 v_B} \quad (21)$$

ここに、 $f_{00} = 1/2\pi\sqrt{L(C+C_{N0})}$ 、 $f_N = 1/2\pi\sqrt{LC_{N0}}$ ただし、 k_D は定数、 C_{N0} はある基準バイアス点における接合容量である。また、 $1 \gg k_D(f_{00}/f_N)^2 v_B$ であるから変化電圧 v_B による周波数変化 Δf_0 は近似的に、

$$\Delta f_0 \approx (k_D/2)(f_{00}/f_N)^2 f_{00} v_B \quad (22)$$

となる。したがって、この v_B が情報信号によるものとすれば、発振周波数は信号によって変調を受けることになり、簡単に周波数変調波がえられる。

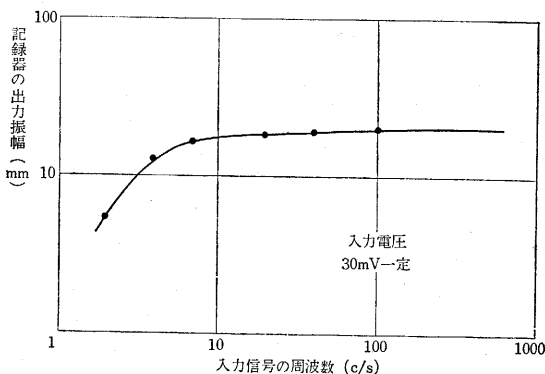
このように、小型送信機の変調および発振器としてトンネルダイオードによる発振器が適していることがわかる。本送信機の発振周波数は、コイル L として0.6 ϕ の銀メッキ線を径8 mmに3回巻き、 $C = 50$ pFとしたとき実測値87 Mc/sである。変調特性は1 mV当たり50 kc/sで直線性も広範囲にわたって良好である。バイアス電圧によって、簡単に変調がかかるという利点の反面、電池電圧の降下による発振周波数のドリフトという欠点をもつ。したがって、電池電圧はバイアス回路によって安定化しなければならないが、電池そのものが安定でなくてはならない。なお、トンネルダイオード 1 T

1103 は 150 mV にバイアスされている.

(3) 高周波電力増幅器 前述したように、発振周波数が機械的振動やアンテナの周囲状況によって変動すれば、実用上問題になるばかりでなく、条件によって、悪い場合には発振が停止してしまうおそれが十分ある。そこで、アンテナを直接に L, C 共振回路に付けることをさけ、バッファとしてその間に高周波電力増幅器を置いた。高周波増幅器は第8図に示したように、スペースの関係でトランジスタのエミッタホロウのみであるが、アンテナとのマッチングという点で非常に良好である。使用したトランジスタ 2SC 271 はプレーナタイプの NPN シリコントランジスタで、その形状は直径 3.8 mm、厚さ 2 mm と非常に小型化されている。

(4) 電源 小型送信機において、電池のしめる容積の割合は大きいので、電池の決定には総合的検討が必要となる。本送信機では小型水銀電池を使用した。その理由は、(a)比較的小型で電流量が大きいこと、(b)他の電池に比べ放電特性がすぐれており、回路が単純になること、(c)水銀電池の端子電圧は 1.3V と低い。が、情報信号は高くとも 60 mV 程度なので、回路を低電圧で動作させた方が消費電力が少なく有利であること等があげられる。使用した水銀電池は 220 mAh \times 2, 420 mAh \times 2 の計 4 個であるが、全消費電力が約 34mW であり、約 30 時間は使用可能である。また、電源の容積は全容積の約半分をしめた。

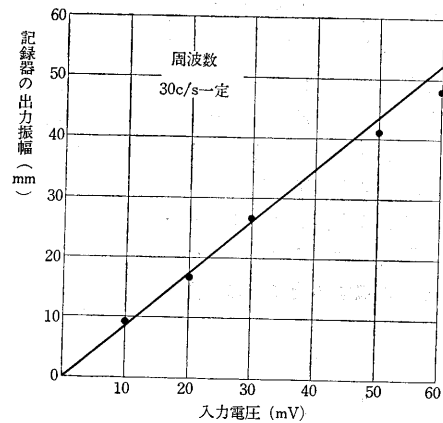
なお、受信機としては通常のFM受信機を使用し、その検波出力を、ビジグラフで記録した。送信機、受信機および記録装置を含む装置全体の周波数特性と直線性を第 10 図、第 11 図に示す。



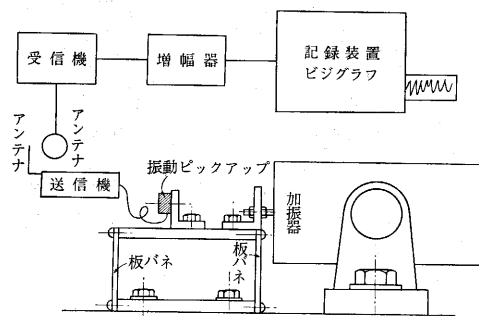
第 10 図 送受信装置の総合周波数特性

4. 実験装置および実験方法

(1) **予備実験** 振動ピック・アップの検定と理論の確認のため、加振器で振動ピック・アップに振動を与え、周波数特性を測定した。実験装置を第 12 図に示す。その際に、振動ピック・アップに横ぶれが生じないように板バネを用いてこれを支えた。十分な振幅をうるため、周波数が比較的高い範囲では固有振動数 150 c/s の板バ



第 11 図 送受信装置の総合入出力特性



第 12 図 予備実験装置図

ネを、周波数の低い範囲では 50 c/s の板バネを用いた。振幅は顕微鏡で 0.1mm まで測定した。前置増幅器の入力インピーダンスを十分に大きくしてあるため、そのままでは周波数特性の折点は実験に用いた加振器の使用周波数以下のところにあって測定できない。したがって、前置増幅器に並列に 5 M Ω の抵抗を入れ(前置増幅器の入力インピーダンスは 150M Ω 以上という高い値であるから、両方で 5 M Ω の入力インピーダンスと考えてよい) 折点の周波数を加振器の使用範囲にあげ、理論式の確認実験も行なった。5 M Ω をつけた場合の実験を実験 I、つけない場合を実験 II と呼ぶことにする。

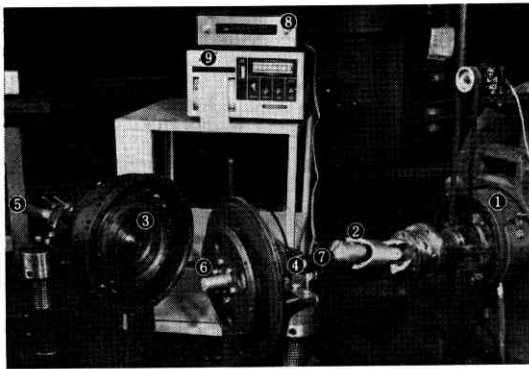
(2) 本実験 トルクコンバータの入力軸に振動ピックアップ・アップを取り付け、回転速度変動を測定した。これを実験Ⅲと呼ぶことにする。電磁式ピックアップによるアナログ方式による測定方法も併用して、結果の検討に役立てた。実験Ⅲの装置図を第 13 図に、その写真を第 14 図に示す。受信機、増幅器、記録装置の結線は、実験Ⅰ、Ⅱの予備実験の場合とまったく同じで、第 12 図に示したので省略する。なお、受信を確実にするため、送信アンテナをトルクコンバータの入力軸に巻きつけ、円形の受信アンテナを入力軸に同心円状に固定した。

入力軸には回転速度変動を与えるため、一定の傾角をもつ2個の自在継手を取り付けた。ここで、モータ軸、連接軸、入力軸が同一平面上にあるとして、モータ軸の

角速度と入力軸の角速度の関係を簡単に解析してみる。第 12 図のように、軸の傾角を δ_1, δ_2 とし、自在継手のヨークを 1~4 と命名し、モータ軸、接続軸、入力軸の回転角をそれぞれ、 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 とする。第 15 図に、接続軸に直角な面に投影した 4 本のヨークと、その両端の軌跡を示す。 ϕ_0 をヨーク 2 と 3 のなす角とすれば、第 15

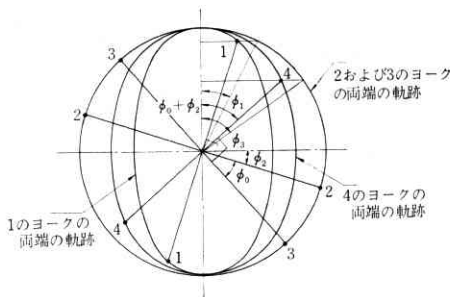
$$\tan \phi_2 = \cos \delta_1 \tan \phi_1 \quad (23)$$

$$\tan(\phi_2 + \phi_0) = \cos \delta_2 \tan \phi_3 \quad (24)$$



①駆動モータ ②自在継手 ③トルクコンバータ ④入力軸
⑤出力軸 ⑥送信機 ⑦受信アンテナ ⑧受信機 ⑨ビジグラフ

第 14 図 実験装置

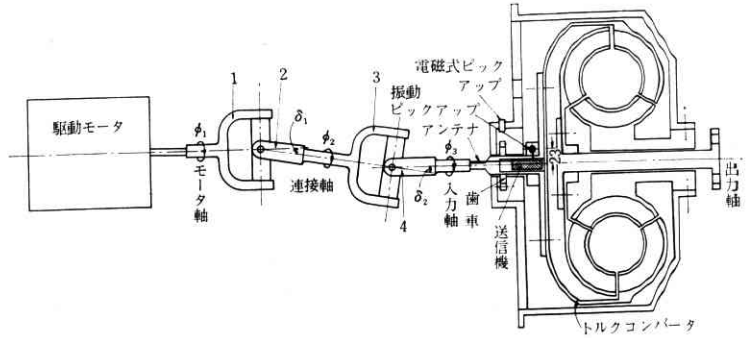


第 15 図 回転角の関係

なる関係をうる。(23), (24)式より、モータ軸の回転角速度 $d\phi_1/dt$ とトルクコンバータの入力軸の回転角速度 $d\phi_3/dt$ の関係として、

$$\frac{d\phi_3}{dt} = \frac{\cos \delta_1 \cos \delta_2}{(\cos \phi_0 \cos \delta_1 \sin \phi_1 + \sin \phi_0 \cos \phi_1)^2 + \cos^2 \delta_2 (\sin \phi_0 \cos \delta_1 \sin \phi_1 - \cos \phi_0 \cos \phi_1)^2} \frac{d\phi_1}{dt} \quad (25)$$

を得る。駆動モータはトルクコンバータに比べて慣性モーメントが非常に大きいため、モータ軸は一定角速度 ω_0 で回転しつづけると考えてよいから、 $d\phi_1/dt = \omega_0 =$ 一定である。ここで注意を要するのは、 $\phi_0 = 0$ かつ $\delta_1 = \delta_2$



第 13 図 本実験装置図

の場合には $d\phi_3/dt = d\phi_1/dt = \omega_0$ となり、トルクコンバータの入力軸は一定角速度で回転することである。この実験では $\phi_0 = \pi/2$ としてあるから、

$$\frac{d\phi_3}{dt} = \frac{\cos \delta_1 \cos \delta_2}{1 - \sin^2 \phi_1 (1 - \cos^2 \delta_1 \cos^2 \delta_2)} \omega_0 \quad (26)$$

となる。 δ_1, δ_2 は小さいから、 $\cos \delta \approx 1 - (\delta^2/2)$, $\cos^2 \delta \approx 1 - \delta^2$ を用いて (26) 式を近似すれば、

$$d\phi_3/dt \approx [1 - \{(\delta_1^2 + \delta_2^2)/2\} \cos 2\omega_0 t] \omega_0 \quad (27)$$

となる。(27)式よりわかるように回転速度変動の周波数はモータ軸の回転数の 2 倍であり、振幅は $\{(\delta_1^2 + \delta_2^2)/2\} \omega_0$ である。一定の傾角をもつ自在継手を 1 個用いただけの場合には近似的に

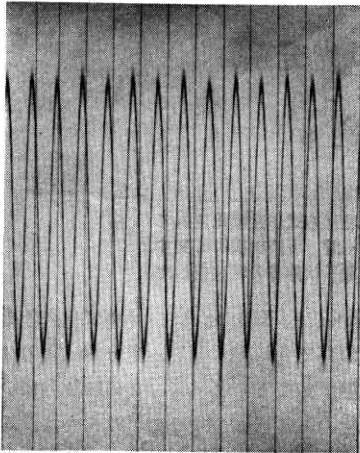
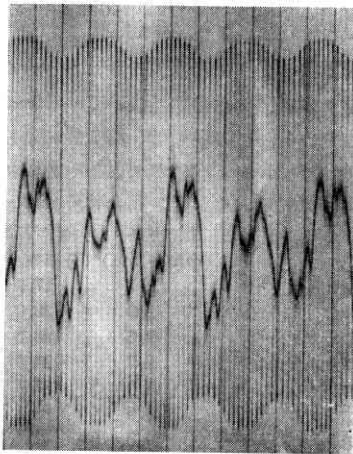
$$d\phi_2/dt \approx \{1 - (\delta_1^2/2) \cos 2\omega_0 t\} \omega_0 \quad (28)$$

であるから、一定の傾角をもつ自在継手を 2 個用いれば、回転速度変動の振幅が大きくなる。ただし、いずれの場合にもその周波数はモータ軸の回転数の 2 倍である。

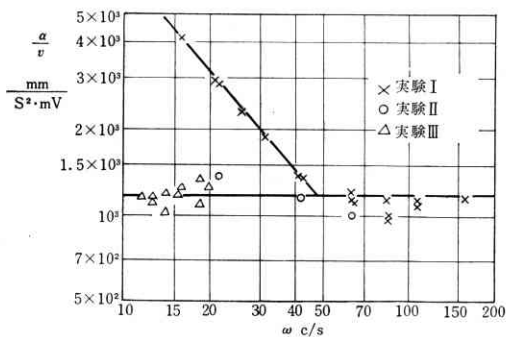
回転速度変動の振幅を大きくして信号を大きくし、信号に対する雑音の割合を小さくすることが望まれるが、そのためには自在継手の傾角を大きくすればよい。理論上は $\pi/2$ まで傾角を増すことができるが、実際には軸受け等に機械的な無理が生じる。本実験では一定の傾角をもつ自在継手を 2 個用いることにより、回転速度変動の振幅を大きくした。

5. 実験結果および考察

ビジグラフで記録した測定例を第 16 図に示す。実験Ⅲの例において、上下の小さい波は、電磁式ピックアップ・アップによるもので、中心部の波が振動ピックアップ・アップによるものである。実験結果より、加速度 α と振動ピックアップ・アップの出力 v の比を周波数に対してプロットしたものを第 17 図に示す。実験Ⅲでは、電磁式ピックアップにより測定した回転速度変動の振幅を用い、(13) 式で $2\pi f = 2\omega_0$, $r = 23 \text{ mm}$ として、 $|\alpha/v|$ の値を求めた。第 17 図には、周波数特性の折点を測定可能範囲にあげた場合 (実験Ⅰ) と、そのままの場合 (実験Ⅱ, Ⅲ) の結果をあわせて示してあるが、理論とよく一致している。実験Ⅰで、周波数特性の折点は 48 c/s である。これより、 $2\pi f = C_e R$ を用いて振動ピックアップ・アップの無応力状態の

実験Ⅰ $f=100\text{c/s}$ $2a=0.1\text{mm}$ 実験Ⅲ $f=37\text{c/s}$ $2E=0.15$

第 16 図



第 17 図 振動ピック・アップの周波数特性

電気容量 C_0 を計算すれば 600 pF となる。実験Ⅱ、Ⅲでは入力インピーダンスが $150\text{ M}\Omega$ 以上という大きな値であるため、周波数特性の折点は 2 c/s 以下となるので、実験の範囲では $|a/v|$ の値は一定である。実験Ⅲの結果のバラツキは、高次の振動が同時に記録され、求めるべき 1 次の振幅を積み取るさいの誤差と電磁式ピック・アップにより測定した回転速度変動の振幅の誤差によるものと考えられる。また、実験Ⅰ、Ⅱの実験結果で、 $70\sim$

100 c/s の範囲で結果がバラツいているのは、板バネの固有振動数が 50 c/s と 150 c/s の 2 種類であるため、 $70\sim 100\text{ c/s}$ の範囲では振幅が小さく、その読取りの誤差によるものと思われる。

実験結果より、振動ピック・アップに固有な値 k は、 $k=1,150\text{ mm/s}^2 \cdot \text{mV}$ と求められ、(13) 式で $2\pi f=2\omega_0=4\pi n_0$ 、 $r=23\text{ mm}$ とすれば、

$$\varepsilon=0.632\text{ }v/n_0^2 \quad (29)$$

となる。ここに、 n_0 は被測定軸の平均回転数(c/s)である。したがって、振動ピック・アップの信号電圧の振幅 $|v|\text{ mV}$ と被測定軸の平均回転数 $n_0\text{ c/s}$ を測定することにより、(29)式を用いて、被測定軸の回転速度の変動率 ε を求めることができる。

6. む す び

本研究により、回転軸の回転速度変動が無線テレメータリングを用いて測定できる可能性を見いだした。従来の有線方式においては、一般に、スリップリングを介して信号を取り出していたが、現象が早くなると、電気的、機械的故障により測定が困難になる。無線テレメータリングによる測定方法では、この問題を取り除き、また、適当なトランスデューサを用いることによって単に回転速度変動のみならず、回転体の中のいろいろな現象を測定することができる。

本研究中、終始ご指導をいただいた石原教授・野村教授ならびに安田助教授に対し厚く御礼申し上げる。また、本実験初期において、現在電気試験所におられる坂本氏の功におうところが大きかった。厚く感謝申し上げます。なお、実験に際し、ご協力いただいた石原研究室、安田研究室、亘理研究室の各位に感謝する。

(1965 年 10 月 11 日受理)

参 考 文 献

- 1) "Piezoelectricity" W.G. Cady McGraw-Hill 1946
- 2) "Piezoelectric Crystals and their Application to Ultrasonics" W.P. Mason Van Nostrand 1960
- 3) "Field-Effect Transistors" Leonce J. Sevin, Jr. McGraw-Hill, 1965
- 4) "Tunnel Diode and Semiconductor Circuits" John M. Canoll McGraw-Hill 1963

正 誤 表 (11月号)

ページ	段	行	種別	正	誤
15	右	上から 8	本文	建築構造物モデル	建築・構造物モデル
44	"	"	第 5 図	m は空気比	
"	"	上から 9	本文	$10^5 \sim 10^6 \text{ Nm}^2/\text{h}$	$10^5 \sim 10^6 \text{ N}^2/\text{h}$
51	"	上から 8	文献	北川徹三	北川徹