

# 超音波流速計および液面計

丹 羽 登・奥 野 裕

## 1. 緒 言

超音波というのは、耳に聞えないような周波数の高い音波という意味である。可聴周波数の上限は人によって違いますが大体 16kc 位と言われており、超音波はその上というわけだが、10kc位から使われている。普通に使用されている上限は 25Mc 位までだが特殊な物性の測定などには 100Mc まで使われた例もある。

このように周波数が高いために波長が短いのでその勢力を集中して一方向にだけ出すことができ普通の音波ではできないような特殊な分野が開けている。

電気を応用する工学が

- 1) 電工学：電気エネルギーを直接利用するもの
  - 2) 通信工学：電流、電磁波によって何かのインフォメーションを得ようとするもの
- の二つに大別されるのと同様に、超音波工学も

- 1) 強力超音波応用：超音波加工、超音波かくはん、超音波洗滌、超音波収塵
- 2) 超音波計測：

の二つの大きな分野にわかれており、送受波器等共通な部分もあるが、全般的にはそれぞれ別個に発達してきていると考えられる。

この超音波計測というが超音波によって何かのインフォメーションを得ようという超音波の通信工学の分野も初期には海の深度の測定、海中の異物の検出等比較的周波数の低い超音波を水中で使う用途および物理学で物性の測定に使う干渉計位の用途に限られていた。しかし

第 1 表 超音波による計測法<sup>1)-6)</sup>

### I) 連続波によるもの

- 1) 透過法：欠陥検査、減衰による材質判定、(水中通信)
- 2) 位相法：流量測定
- 3) ドプラー法：警報装置
- 4) 共振法
  - a) 共振周波数：板厚測定、音速測定
  - b) 共振強度：欠陥検査、粘度計
  - c) 共振距離：干渉計、音速測定

### II) インパルスによるもの

- 1) 透過法：欠陥検査、遅延回路、模型地震学
- 2) 反射法：欠陥検査、液面計、測深機、魚群探知機
- 3) 共振法：音速精密測定

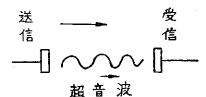
最近、エレクトロニクスの進歩、特にレーダー等によるパルス技術の進歩などによって超音波を使って何かを測る、なんらかの情報を得るという要望が各所に現われ着々とその応用分野が拡がっている。その内容を、原理別に大別したのが第 1 表である。

この中には上記の測深機、魚群探知機等すでに完全に実用化したものもあり、欠陥検査等、材料の非破壊検査の方法の一つとして最近急速に進歩しかけているものもある。また音速の精密測定など、方法としてはこの表にあげることができても、研究室でまれに使われるだけというものもある。

筆者らはここ数年超音波による非破壊検査法の研究、実用化につとめてきたが<sup>7)8)</sup>、超音波による流量の測定、液面の高さの測定などが本邦の工業界から、かなり具体的な要望があり、筆者らの研究室の経験を有効に生かして実用化をはかることができそうに思われたので、外国の少数の例を調べ、かつ実験を始めた。ここにその概要をご紹介します。

## 2. 超音波流速計

流体の流速を正確に測定することは水力発電所や化学工場等においてこれから流量を求めめるためにも非常に重要なことである。今日まで流速測定の最も広く使われているのはピトー管であるが構造が簡単な割に取扱いが容易でなく指示に時間的な慣性があるためこまかい流速の変動には応じないこと、また低流速 10cm/sec 以下は測定困難になる欠点がある。この欠点は超音波を使えば以下に説明するように完全に除き得る。すなわち指示にタイムラグがほとんど無く



値を自記記録計に入れて記録できる。また特に低流速 (0.1cm/sec 程度まで) で精度がおちないという秀れた特長を示す。

### 2・1 原 理

2・1・1 単流法<sup>9)</sup> 第 1 図に示すように流れに平行に二つの電気音響変換器 (Transducer) を向い合わせ一方を送信、他方を受信として、超音波の連続波を出せば送信波と受信波の位相差は流速に比例する。

いま送信波を

$$E_1 = A \sin \omega t \dots \dots \dots (1)$$

とし受信波が流体中を通る伝播時間を  $\tau$  とすると

$$\tau = \frac{D}{(c+v)} \dots\dots\dots (2)$$

ただし  $D$  は送信器, 受信器の間隔,  $c$  は音速,  $v$  は流速で送→受の方向に流れるものとする. したがって受信波  $E_2$  は

$$E_2 = \kappa A \sin \omega \left( t - \frac{D}{c+v} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\kappa = \text{const.}$$

送受の位相差  $\Delta\phi$  は  $c^2 > v^2$  として

$$\Delta\phi = \omega \frac{D}{c+v} \approx \omega \left( \frac{D}{c} - \frac{vD}{c^2} \right) \dots\dots\dots (4)$$

と書ける.

この位相差を固定の位相差分  $\alpha$  と, 流速に関係する項  $\beta$  とに分け, 数値例として

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = 2\pi \cdot 10^5 \text{ rad/sec}, f = 100 \text{ kc} \\ D = 10 \text{ cm} \\ c = 1.5 \times 10^5 \text{ cm/sec (水中)} \\ v = 100 \text{ cm/sec} \end{array} \right.$$

を入れると

$$\alpha = \frac{\omega D}{c} = 42 \text{ rad} \approx 2400^\circ$$

$$\beta = \frac{\omega v D}{c^2} = 2.8 \times 10^{-2} \text{ rad} = 1.6^\circ$$

となりもし  $c$  か  $D$  が 0.1% 変化したとすると  $\alpha = 2.4^\circ$  となって測定したい  $\beta$  分より大きくなってしまふ.

以上のように流れに対して一方のみ伝播させる方法は原理的には考得るが実用にならない.

**2-1-2 複流法**<sup>(6)(7)(8)</sup> 前述の単流法では流速に関係しない大きな位相推移が実用化をさまたげたわけであるがこれは周期的に (例えば 1 秒間に 10 回~100 回) 超音波の伝播方法を逆にすることで除き得る.

いま沿流の際の送受の位相差を  $\Delta\phi_1$ , 逆流の際を  $\Delta\phi_2$  とすれば(4)式から

$$\Delta\phi_1 = \omega \cdot \frac{D}{c+v} \approx \omega \frac{D}{c} - \omega \cdot \frac{vD}{c^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta\phi_2 = \omega \cdot \frac{D}{c-v} \approx \omega \frac{D}{c} + \omega \cdot \frac{vD}{c^2} \dots\dots\dots (5)'$$

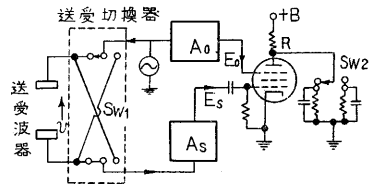
両者の差をとると

$$\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \left| 2\omega \cdot \frac{vD}{c^2} \right| \equiv \Delta\varphi \dots\dots\dots (6)$$

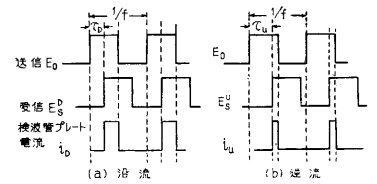
したがって  $\omega, D, C$  が一定とし,  $\Delta\varphi$  を測定すればこの値からただちに  $v$  を知りうる.

第2図はこの方法のブロックダイアグラムを示したものである. 超音波周波数の電源となる水晶発振器が中央にありこれが一方は送受切換装置へ他方はリファレンスの電圧として増巾後 ( $A_0$ ) 位相検波管の第三グリッドに入る. 受信出力も増巾後 ( $A_s$ ) 同じ真空管の第一グリッドに入れる. この関係を第3図で説明すると  $E_0$  は第3

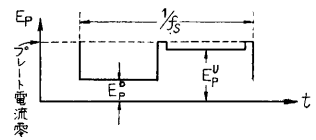
グリッドに入る送信電圧 (増巾器中で正弦波をリミッタに入れて矩形波にしてある) を示し  $E_s^D$  および  $E_s^U$  は第1グリッドに入る受信波である. (a) 図は沿流の場合で  $\tau_D = D/(c+v) - \kappa$  だけおけている. なお  $\kappa$  は一定の位相推移でこれは適当に調節し得る.  $i_D$  はこの場合のプレート電流で



第2図 復流法流速計構成図



第3図 位相検波の状況



第4図 検波管陽極電圧

間巾をもつ. 同様に (b) 図は逆流の場合で,  $\tau_U = D/(c-v) - \kappa$ ,  $i_U$  は  $[1/2f - \tau_U]$  の時間巾をもつプレート電流を示す. また第4図は同上位相検波管のプレート電圧をあらわす.  $f_s$  は送受切換の周波数で沿流の時は平均値として大きなプレート電流が流れるから  $E_p^D$  は低く, 逆流の際はプレート電流は小, したがって  $E_p^U$  は高くなっている. 検波管の最大プレート電流を  $i_s$  とすれば沿流期間の平均電流  $I_D$  は

$$I_D = \int_0^{1/2f} i_D dt = i_s f \left( \frac{1}{2f} - \frac{D}{c+v} + \kappa \right) = i_s \left( \frac{1}{2} - \frac{fD}{c} + \frac{fDv}{c^2} + f\kappa \right) \dots\dots\dots (7)$$

また同様にして逆流期間の平均電流  $I_U$  は

$$I_U = i_s \left( \frac{1}{2} - \frac{fD}{c} - \frac{fDv}{c^2} + f\kappa \right) \dots\dots\dots (7)'$$

$E$  を電源電圧,  $R$  を負荷抵抗とすれば

$$E_p^U = E - I_D \cdot R \dots\dots\dots (8)$$

故に

$$E_p^D = E - i_s \left[ \frac{1}{2} - \frac{fD}{c} + \frac{fDv}{c^2} + f\kappa \right] \cdot R \dots\dots\dots (9)$$

同様にして

$$E_p^U = E - i_s \left[ \frac{1}{2} - \frac{fD}{c} - \frac{fDv}{c^2} + f\kappa \right] \cdot R \dots\dots\dots (9)'$$

両電圧の差  $\Delta E$  は

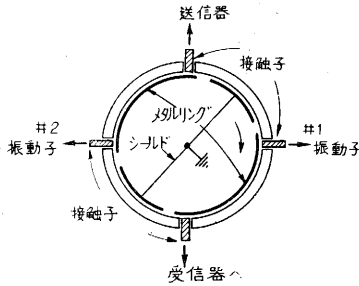
$$\Delta E = E_p^U - E_p^D = 2i_s f \frac{Dv}{c^2} R \dots\dots\dots (10)$$

第(10)式を見ると  $\Delta E$  は  $D$  および  $c$  の変化によりそれぞれ1乗, 2乗で変化し固定位相推移分の  $i_s f (D/c)$  の項が消去されるので単流法にもなる不安定性は完全

に除かれた。あとはこの  $\Delta E$  を適な方法 (例えば後述する同期整流器) に入れて電流計をふらせばその目盛りからただちに  $\eta$  が読めることになる。

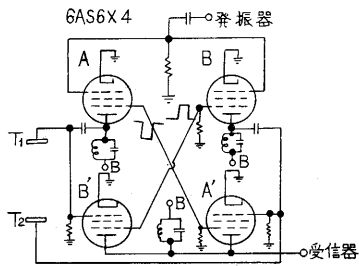
2・2 送受切換器

機械的に行う方法と電気的に行う方法と二つある。第 5 図は機械的な方法の 1 例で外の輪が固定、中がロータとして軸がモータに直結され回転する。ステータには四つの接触子が出ていてそれぞれ図示のような接続をすれば送信→#1, #2→受信、これから 90°回転すると送信→#1, #2→受信、となり以下モータの回転と共にこれをくり返して送受の機能を切りかえる。この際送信側と受信側にリークage があると測定値に誤差を生ずるので送受間は十分高周波遮蔽をすることが必要である



第 5 図 ロータリ型切換スイッチ

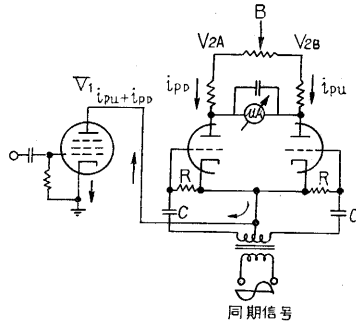
が構造上ある程度以下に減らすことは困難なことや接触子とロータの導体リングの接触は連続長時間運転する際に不安があること等、次に説明する電子管スイッチに比して劣る。



第 6 図 試作電子管切換スイッチ

第 6 図に電子管スイッチ回路の 1 例を示す。ゲート用の真空管 6AS6, 4 本を図のように接続しそれぞれ真空管の第 1 グリッドには高周波, 第 3 グリッドに切換用の矩形波出力を入れ適当なバイアスをあたえておく。A, A' および B, B' の  $G_3$  は共通で互に逆位相の矩形波でスイッチするので, ある切換の半サイクルでは発振器→A→T<sub>1</sub>→T<sub>2</sub>→A'→受信器, 次の半サイクルでは発振器→B→T<sub>2</sub>→T<sub>1</sub>→B'→受信器となり以下これを繰り返す。これは非常に簡単な例であるが実用上差支えなく十分安定に動作する。また真空管や素子の配置, 配線に気をつければ送受間の結合も小さく得る。

同期信号

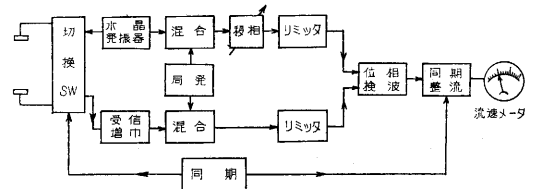


2・3 同期整流器<sup>10)</sup> 第 7 図 同期整流器

先に原理の項で述べた  $E_p^D$  と  $E_p^U$  の差  $\Delta E$  を読むために考えられた回路である。第 7 図の通り二つの 3 極管はトランスの一次側に入った同期信号のために半サイクル毎に交互に開閉の状態となる。一方前述した位相検波管の出力は適当な増巾管  $V_1$  の格子に入れプレートはトランス二次側の中心に直結する。したがって例えばある切換の半サイクルに沿流分の電流は  $V_{2A}$  を流れ, 逆流分の電流は  $V_{2B}$  を通るので両者の陽極電圧降下差をメータで読めば  $\Delta E$  が測定できる。

2・4 流速計回路の 1 例の

以上で原理と主要部の説明を終って実験の回路について説明する。第 8 図は筆者らが試作した回路の構成図で



第 8 図 当所試作超音速計構成図

ある。中心は水晶発振器で, ここで測定したい流体の種類や流速変化の範囲等を考えに入れて (6) 式から最適周波数をえらぶことになる。この出力の一部は前述の切換スイッチへ送り他方は受信電圧と比較のために使われる。ここで問題になるのは送受両信号の位相を比べるところまで高周波をストレートで通すか, または局発信号と混ぜて低周波に直してから位相検波器に入れるかということである。周波数が比較的低いとき (100 kc 以下) ならばストレートで行うのも製作上そう困難はないが, 高くなるとやや難しくなる。筆者らは周波数を 900kc に選んだので安定性の上から後者をえらび局発信号 (910 kc) と混ぜて送受側共中間周波 10kc を得た。送信側はこの低周波を移相器を通した後, 正弦波から矩形波に直すためリミッタに入れる。リミッタにはいろいろ種類も多いが波形の正しさが精度を高めるためにも要求される。ここでは陰極結合限流器が簡単であり波形も良いので採用したが, ただこれは入力に余り小さいと (5V 以下) 良い波形が得られなくなるので注意を要する。また受信電圧は  $D=20$ cm で約 +db 減衰するので高周波二段増巾後, 送信側と同様混合してリミッタに入れる。こうして得られた送受二つの矩形波を先述した 6AS6 の  $G_3, G_1$  にそれぞれ入れる。  $G_3, G_1$  のバイアスは条件によって変わってくるがプレート電圧 150V, スクリーン電圧 150V, 入力矩形波電圧約 10V で  $G_3$  が -12V,  $G_1$  が -6V で最適であった。

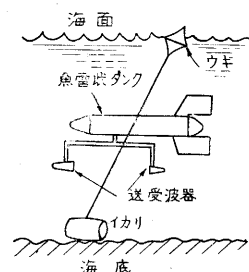
同期信号は 12AT7 1 本をフリーランニングのマルチバイブレータとして働かせ二つのプレートから逆位相の電圧を取り出しそれぞれ増巾, 成形して (約 15V) 切換

信号として使った、またどちらか一方の信号をなまらし正弦波に近くしてから同期整流器のトランス一次側に入れる。

電源はそのレベル変動が各部の正常な動作をさまたげることが大きいので十分安定化する必要がある。バイアス用電源には電池を使用した。

### 2・5 トランスデューサおよび取付方法

電気音響変換器としては使われる周波数が高周波であることから水晶振動子かチタン酸バリウム振動子かのどちらかになる。実際の測定にあたってはトランスデューサと測定器本体は距離的に相当はなれその間をケーブルで結ぶことが多い。このような事情を考えればチタバリ振動子は水晶に比しはるかにインピーダンスが小さいので、長くひっぱったケーブルから誘導を拾うことも少なく S/N を高く保つために適している。ただし測定器の入出力は高インピーダンスであるから整合を良く取らない



第 9 図 海、河の流速分布を測定

と流体中に必要な超音波勢力を送り、また受けることができない。トランスデューサの取付方法にも用途によりいろいろ考えられている。第 9 図<sup>11)</sup> は河や海の流れの分布を測定するためのもので測定器本体を図示の魚雷状のタンクにいれ送受波器はその下に張出して取付ける。魚雷は測定したい任意の場所と深さを自由に動かすことができる。流速の値は魚雷中の 8% のシネフィルムで方位と時間を共に記録される。電源は蓄電池と 400 サイクルのロータリコンバータで供給されイカリの中に取められる。

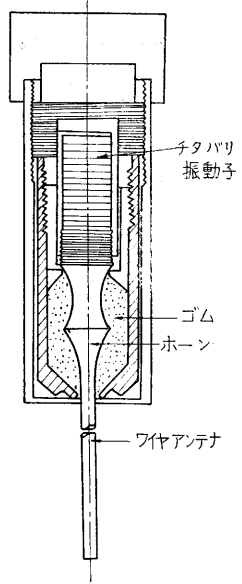
細いパイプ中を流れる液体の流速測定にはパイプ外面に水晶またはチタバリ振動子をはりつけるだけで済むので他の機械的方法に比し流れを乱すことがぜんぜんない。ただこの際注意すべきことは管の直径に比し波長が大きくなると超音波がパイプ中を通らなくなることでパイプの半径を  $a$ 、カットオフの周波数を  $f_c$ 、 $c$  を伝播速度とすると

$$f_c = \alpha_{mn} c / 2a \dots\dots\dots (11)$$

ただし  $\alpha_{mn}$  は  $\frac{dJ_m(\pi\alpha)}{d\alpha} = 0$  の解  $n=1, 2, 3, \dots$  の関係がある<sup>9)</sup>。

以上の二つは測定範囲が比較的小さく流速分布をしらべるのに適当であるが一方水力発電所等でダムからの水の取入口で平均流速から流量を測定したい場合には適さない。このために工夫されたトランスデューサが第11図

に示すもので<sup>12)</sup>、電波のアンテナのアナロジーで針金を使う。これをダクトの天井から底まで数米の間を張り一方の端の断面を磁歪またはチタバリ振動子にはりつける。針金には長さ方向に圧縮波が伝わり振動の腹では半径方向に断面が広がったり、ちぢんだりして超音波が水中に発射される。このときの振動状態を測定するのにもいろいろ考えられている。例えば針金を水面に平行に浸し上方からグリッドを通した光線が水面で反射させてカメラで写す。針金が励振されれば各部の振巾によって水が乱されフィルムにはグリッドがひずんでうつ



第 11 図 アンテナ型トランスデューサ

る。また、針金を規定の周波数で励振しておき一方からパルスを送る。同時にブラウン管で観測していれば振動の腹または節から反射したパルスがエコーとして現われその位置から振動の様子がわかるし、この方法を使えば振動子と針金、針金と終端のミスマッチングもすぐわかりこの種のトランスデューサを使うときの有力な測定手段になる。第 11 図は励振部の断面図で周波数 25kc、振動子にはチタバリ振動子を沢山重ねて使っている。

### 3. 超音波液面計

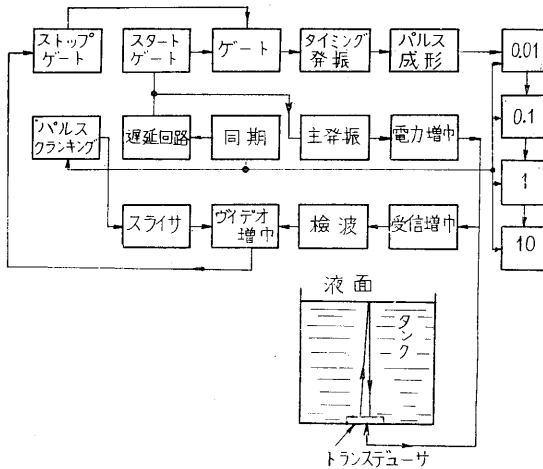
化学工場や石油精製工場等でタンク中の液体のレベルを正確に測定することは単に経済的な面からだけでなく自動的な生産管理をするためには是非必要なことである。したがって各種のゲージが使われているが多くの場合、簡単なディップスティックや Calibration chain を使っている。これらはいずれも余り高い精度は望み得ず連続指示や記録に適さない。

以下超音波パルスを使い精度 0.01 フィートでデジタルに測定値を指示する新しい液面計を簡単に紹介する。

#### 3・1 原理

原理は簡単で超音波パルスをタンクの底から上面へ発射し液面で反射して帰ってくるまでの時間を測定すれば高さがわかる。ただしこの場合は液体中の音速は一定不変と仮定しているのでもしタンク中で密度や温度の差があれば当然音速は変化して測定値は真の液面を示さない。

比較的小型のタンクで音速が一定であることが解っていれば上の原理をそのまま使っても実用になる。第12図



第 12 図 超音波液面計原理図

は簡単な液面計の構成図を示す。超音波の周波数は 400 kc, パルス巾は 100ms で電力増中後タンク底面に取付けた振動子に加える。受信出力は 3 段増中後検波し 1 段ビデオ増中する。一方液中 0.01 フィート伝播す時間に相当する周波数(例えば水の場合は  $4\mu s$  で 250kc)をタイミング発振器でつくりこれを送信波が発射されたときスタートし受信波が帰ってきたとき停止させる。タイミング発振器の波形は正弦波であるが、これをパルスに直しネオンラムプカウンタ<sup>14)</sup>に入れて伝播時間中に入ったパルスの本数を数えれば、1本が 0.01 フィートに相当しているからこれよりただちに液面の高さを知ることができる。

3.2 自動補正型超音波液面計<sup>13)</sup> 前項で述べた液面計は音速が他の条件で変らない場合にだけ実用可能であるが、実際にはこのような条件は少ない。大型のタンク

では温度分布が場所により相当変っていることが予想される。そこで取り得る音速を自動的に補正し常に正しい液面を示す実用的な液面計が工夫された。第 13 図はこれの構成図で前と異なる点は一つのタンクにつき 2 個のトランスデューサを用いることである。一つはメインの送受に、他は音速補正に使用する。これらを音響ガイド(普通のパイプ)の底にとりつける。補正用ガイドの内面には適当な間隔(4—8 フィート)で突起が出てこれに超音波パルスが当ればエコーを生ずる。補正用送信、受信は主回路と全く同様で受信出力は検波増中後位相検波器に入れる。一方カウンタの適当なレンジからも位相検波器に入っていてこのパルスと突起からは反射された一連のパルスの時間的な関係を比較する。高さ方向に音速分布が一定のときは位相検波器の出力は零であるが、音速差があれば両者のパルス間隔にずれができ、このずれに比例した直流出力があらわれる。この直流出力はタイミング発振器にフィードバックされ両者のずれが無くなるまで周波数を推移する。こうして指示は音速の変化に影響されず常に真値を示すことになる。現場ではカウンタおよび本体はタンクから相当離れた計測室におかれその間をケーブルを結び、また 1 台の測定器をスイッチで切換えて数個のタンクを受持たせる。

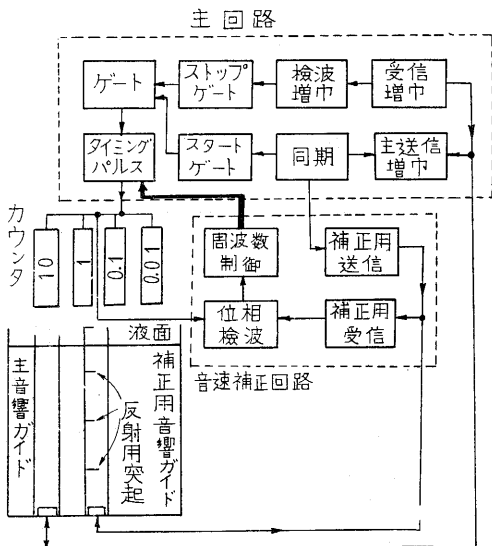
4. 結 言

超音波による工業計測の内流速計、液面計の主として測定回路について述べた。これらは比較的新しく開発されたもので国内では未だ実用になっていないと思うが、精度が極めて良いこと、連続測定ができること、自動制御の検出部としてそのまま使えること等を考えればオートメーション化のやかましい今日、現場で実用される日も近いと考える。

終りに常にご指導いただいている高木昇教授および筆者らの流速計の実験にご協力いただいた当所 5 部井口助教授、水理実験室臼井助手に厚く御礼申上げる。

文 献 (1956.10.9)

- 1) 日本學術振興会編 超音波探傷法 '56, 丸善
- 2) 例えば高木, 丹羽, 在下橋, 直視型超音波厚み計とその応用 電学誌 74, 789 ('54)
- 3) 鳥飼, 藤森, 橋岸, 振動型粘度計 本誌 8, 5, 31 年 5 月
- 4) 望月, 超音波による流速測定 30 年 連大
- 5) 望月, 超音波による流速測定 31 年 連大
- 6) 丹羽, 奥野, 電子管切換型超音波流速計 31 年電気学会 東京支部大会
- 7) H. P. Kalmus Electronic Flowmeter System R.S.I. 25, 3, March. '54
- 8) H. P. Kalmus The Acoustic Flowmeter using electronic A. L. Headrich Switching I. R. E. Conv. Rec.' '54 D. R. Pardue
- 9) R. E. Beatty Boundary layer attenuation of higher order modes in rectangular and circular tubes. J. A. S. A. 22, 6, '50
- 10) N.A. Schuster A phase sensitive detector having balance stability R. S. I. 39, Apr. '51
- 11) K. S. Stull Ultrasonic phase meter measures water velocity, elect. Sept. '55
- 12) R. C. Swengel Antennatype transducer for ultrasonic flowmetering I. R. E. Conv. Rec. '56
- 13) R. L. Rod Ultrasonic liquid level indicator Systems. elect. Apr. '54
- 14) R. L. Rod Gated lamp decade. elect. Oct. '52



第 13 図 自動音速補正型液面計構成図