

海岸計測論

九州大学助教授（応用力学研究所） 光 易 恒

まえがき

海岸工学の分野においても、海岸構造物や港湾構造物などの設計ならびに工事、あるいは各種の海岸災害の防止対策などに関連して現地観測を行なつて、海象（波、流れ、潮汐など）ならびに気象（主に風）に関してできるだけ信頼できる資料を得る必要がしばしば生じる。このような現地観測は研究者が特別な研究目的で行なうものを別とすれば、それぞれ専門の国家機関、あるいは民間組織（例えば、調査研究を専門とする民間企業）などにまかせた方が能率的だという考え方もあるが、現在のところ、そのような充分な態勢にはなつてはいないし、また、きめの細かい観測資料を得るためには、現場の技術者がある程度（実際には多くの場合）これを行なわなければならないのが現状である。

しかしながら、この現地観測という作業は少しでもそれに関係した人は身にしみているように、極めてやつかいな仕事で、よほどいろいろな点に注意を払い、しかもある程度経験をたんだ上でないと信頼できる資料を得ることは困難である。

現地観測というのは、問題の性質に応じた観測計画の決定（測定量の選定、測定法、測定器、測定点ならびに測定期間などの決定）測定器ならびに観測施設を準備した後の現地における計測の実施、さらに、得られた計測データの処理、ならびに解析といった一連の操作を意味する。この一連の操作はそれ自体一般の計測、例えば、物理計測や工業計測などと特に変わらず、事実、多くの測定器としては、基本的には工業計測器と同様なものを使用できるのであるが、測定を自然条件のままの現地（多くの場合、海上）でおこなわなければならないためにさまざまな困難が生じてくる。その困難は単に観測作業のみにとどまらず、測定量の選定、計測器自体、あるいは計測のシステムにも生じてくる。

測定器として、基本的には工業計測器と同様なものを使用できるとはいつても、やはり、現地観測用の測定器にはそれ固有の特別な厳しい機能が要求される。このように観測用の測定器は特に厳しい性能が要求されるにもかかわらず、一般的にみて、かなり不完全な状態にある。^{*}

測定器は使用者の側からみれば、一種の暗箱 black box でいいという見方ができる。すなわち、その内部機構はどうであつてもよく、ともかく定められた方法で使用すれば定められた機能をはたし、定められた精度の測定値を与えるものであればよい。最近の各種の試験用の測定器、例えば、シンクロスコープ、

＊）工業計測器などに比して、使用条件がはなはだ悪いこと、メーカーの側からすれば需要が少ないので、一つの計測器にあまり開発研究費をかけないこと、使用者は絶えず目新しいものを要求すること、観測用の測定器を本格的に研究する組織がほとんどないこと、などがつぎつぎに完成度の低い測定器を生みだしている原因と考えられる。

発振器、あるいは規格化された増巾器などはある程度この要求を満たすものになつてきている。これに比べると、現地観測用の測定器は、はなはだ完成度が低い状態にある。こうなると、現地計測を行なつて信頼できるデータを得るには、測定器に関してもかなりの知識と経験とを有し、測定器の欠陥をある程度観測者が補ってやることも必要になってくる。

しかしながら、ここで測定器一般に目を転じてみると、最近のいわゆる電子工学の極度に速い発達により、電子計測技術の進展には目ざましいものがある。それらは、オートメーションに関連した工業計測の分野で、あるいは宇宙開発や海洋開発に関連した高度の計測の分野で盛んに馳使されており、海岸計測の分野でも、現在のところ断片的ではあるが、しだいに利用されるようになってきている。

このような状況を考慮して、本論では最初に計測と観測の内容に簡単にふれた後、測定器に関する基本的な事項についてやや詳しく述べる。ただし、個々の現地観測用の測定器には立ち入らないで、各種の測定器に共通した基礎的な事項についてのみ述べる。これらは、いわば測定器に関する常識的な事項ともいえるものであって、必要な個々の測定器の選定ならびに測定系の構成に際し、あるいはそれら进行操作して測定を行なうのに際し、基本的な指針を与えるものと考えられる。

次に、電子計測器を導入して、海岸工学に関連した計測システムを構成するに際して、しばしば利用される計測器の主要な構成要素について少し具体的に述べる。ただし、これらの計測器を設計、あるいは試作する立場からではなく、むしろ、要素的な完成品をその特徴を生かし、あるいは、合理的に組み合わせて使用するという立場より記述し、その特徴と主要な性能、使用上の注意などの概略をあげるにとどめる。さらに詳しい内容に関しては、終りにあげたそれぞれの専門的な図書を参考にされたい。

また、個々の現地観測用の測定器、ならびにそれを用いた観測法に関しては終りに参考文献としてあげたような数々のすぐれた解説書があるので、必要に応じてそれらを利用されたい。

1 序 論

1-1 計 測

計測という言葉は一般に物理学や工学などにおいて種々の量を測定する場合、その測定法、使用する測定器、得られた測定値の処理などを含めた一連の手続きを総称としたものとして用いられている。測定の対象に応じて計測法は多種多様なものとなるが、重要なことは、十分に精度の高い適切な測定値を得ることで、このために測定法、測定器の選定とその取扱い、測定値の処理などに関し充分なる配慮が必要となる。

1-2 測定と観測

測定とは厳密に云うと物理量を数値で表わすための操作を意味し、各物理量に基準となる単位量を定め、測定されるべき箇々の物理量がその単位量の何倍に等しいかを比較し、決定してその倍数をもつて測定値とする。したがって、測定が行なわれるためには、測定されるべき量が物理的にどんな種類の量であるかがはっきりしており、その単位が定まっていなければならない。

これに対し、観測というのは、一般に天体、気象、海象などの自然現象の観察、あるいは計測器を用いた

測定を意味する。ここで、観測における観察の役割を少し考えてみると、すぐれた測定器のなかった時代には観察は自然認識の重要な手段であったのであるが、その重要性は現在でも失われていない。測定では、個々の量が定量的に求められるけれども測定量は測定器の種類、数によって制限される。これに反して、観察では定性的ではあるが多数の量、ならびにある時にはそれら相互間の関連を同時に検出し、ある程度総合判断してまとめあげる作業を on line で行なっている。したがって、同じ環境を再現することの困難な現地観測に際しては、単に測定器を上手に操作して測定を行なうだけでなく、現象の注意深い観察が必要である。もちろん、深海の微弱な流れや不規則な風波の中に重っている微少な長周期の波などは目視観測で見出すことは不可能に近いので、これらを測定するにはすぐれた性能を有する測定器が必要であることはいうまでもない。

1-3 室内実験と現地観測

自然現象の中の特定の現象に注目して、その現象に関連している支配的な物理的あるいは化学的量を測定し、その現象の内部機構を実験的に追求するという点に関しては室内実験も現地観測も本質的な差異はない。その差異は次のような点にある。室内実験では、多くの場合、できるだけ条件を単純化して、当面調べようとする現象をできるだけ純粋な形で、制御された条件のもとに再現し、支配的な要素を系統的に変化しながら測定を行なう。

したがって、室内実験においては、如何にして現象の本質的な点を純粋な形で生ぜしめるかということが実験の一つの成功につながる場合すらある。

これに反して、現地観測においては、各種の物理的ならびに化学的過程が複雑に入り組んでいる実際の現象を現地でそのままの形で、できるだけそれを乱さないように注意しながら各種の要素的な量の測定を行なう。注目している現象の機構を解明しなければならない。当面調べようとしている現象を他の現象から切り離すことなく測定を行なわなければならないところに現地観測の一つの困難が横たわっている。すなわち、調べようとしている特定の現象は非常に多くの様々な要素の影響を受けている場合が多いので、その現象に関連していると考えられる各種の量を同時に精密に測定しなければならないが、あまり関連のない量を同時に非常に多く測定するのも実際的でない。

1-4 海岸計測の対象

一般に海岸計測の対象となる現象としては次のようなものが考えられる。

- (i) 気 象： 風、気温、湿度、雨量など
- (ii) 海 象： 波、流れ、潮汐、水温、漂砂など
- (iii) 地 象： 地形変化、地震、土圧、地下水など

さらに、箇々の現象についてみると、例えば風の場合、時間的に変動するベクトル場であるので、風速、および風向が主要な測定量となり、さらにそれらの時間的変化ならびに空間的分布を求めることが必要になる。波の場合には事情はもっと複雑で、水面波形（水位の空間的分布）ならびにその時間的変化、水中の圧力変動、ならびに流速変動、物体に及ぼす力などが主要な測定対象となる。

このように特定の物理現象についてみても、測定対象は様々なものがあるけれども、実際に測定器で検出する量は多くの場合、長さ、あるいは変位、時間、速度、加速度、圧力、温度などの基本的な量ともいえるものである。したがって、原理的には工業用計測器と同様な形式のものが使用できる。

2 測定器に関する基礎的事項

2-1 測定器の機能と構成

測定は測定器を用いて行なわれるが、この場合、測定器は観測者の視覚、聴覚あるいは触覚などを通して未知の量と既知の量との等不等の信号を与える。^{*} 例えば、最も単純な測定器ともいえる物尺で長さを測定する場合を考えてみればこの間の事情がよくわかる。

a) 変換 測定において未知の量を直接に検出して、既知の同種の量と比較するという方法は、できれば精度が高いので望ましいけれども種々の事情で極めてまれで、多くの場合、その量と一定の関係にある他の量に変換して測定する。例えば、温度の測定をするのに金属や半導体の電気抵抗が温度により一定の変化をする性質を利用した電気抵抗型の温度計を用いて行なうのがその一例である。

このようなある物理量をそれと一定の関係を有する他の量に変換する装置を変換器 transducer と呼び、最近、各種の物理量を特に電気量に変換する形式の変換器が急速に発達してきている。一度電気量に変換すれば、各種の増巾器、演算器などをかなり自由に駆使することができるので、そのあとの処理が非常に容易となる。

b) 拡大 測定器の他の大きな機能は信号の拡大、あるいは縮小である。機械的なものにはよく知られているように、各種の挺子、歯車、リンクなどがあり、光学の方法も最も確実な方法の一つとして古くよりよく用いられている。しかし、最近は電子回路の信頼度の増大とともに、機械的な要素を極力減じ、電気量に変換して拡大する方法、すなわち増巾器の使用が非常に多くなってきている。

c) 変形 変換器の性質上、被測定量と変換器の出力が、一対一には対応しているが、直線的な関係になかったり、変換器の応答が完全でないため非常に速い変動には追尾しない場合がある。例えば、流速 u を測定するのにピトー管により動圧 $p = \frac{1}{2} \rho u^2$ を検出した場合、普通の変換器は p に比例した信号を出すので出力は u^2 に比例する。このような場合、信号を電気量に変換すると、入力平方根に比例した出力を出す演算回路を使用して、流速 u に比例した信号を取り出すことができる。また、変換器が後述する周波数特性を有する場合、逆の周波数特性を有する電気回路を利用することによって特性を補償したような例もある。

このほかにも、各種の電気フィルターを利用して必要な周波数範囲の信号のみを検出して、他の周波数範囲の信号を除去したり、スペクトル密度が周波数により著しく変化している信号を広いスペクトル範囲にわたって忠実に測定するためにスペクトルをできるだけ一様にするような定まった回路を利用して信号を前もって変形して測定を行ない、それを分析したあとで回路の特性を補正して正しいスペクトルを求めるといった

^{*} 最近はこの判別を器機が自動的に行なって、その結果を数値として打ち出すようなものもある。

方法も使用される。*)

d) 伝送 検出部、あるいは変換器は勿論、測定現場に設置されていなければならないが、指示、記録部は同一場所に置くのは必ずしも得策ではない。したがって、検出され変形された信号を離れた地点の観測室などに伝送し、そこで記録する必要が生じる。一般に、それは有線、無線を利用して行なわれ、伝送途中に信号の精度を低下させないように様々の工夫がされている。また、場合によっては検出部を非常に延長して(多くの場合数100mが限度であるが)変換器を現地にある検出端より離して記録器側におく場合もまれにはある。

e) 表示、記録 各種の変換器で変換され、場合によると増巾、あるいは変形(補償)された信号は最終的には、マノメーター、あるいは電気メーターなどで指示されるか、各種の記録器、例えば、ペン書オシログラフ、電磁型のオシログラフ、自動平衡型の記録計あるいは磁気記録器 data recorderなどで記録される。この記録部も増巾器とともに最近非常にすぐれた性能のものできている。しかし、現地観測用の測器としてみると、消費電力の問題、悪条件下における耐久力の問題などが充分には解決されていない。

f) 処理 最近の新しい傾向として最終的な計測データを単にアナログ量として記録するかわりに、自動的にデジタル化し、数値として記録したり、そのまま電子計算機に送りこんで処理したりする場合がある。

以上述べた測定器の各機能を受けもつ部分をとりまとめると、その構成は図-1のようになる。もちろんこれらの各部がすべてそなわ

っているとは限らないし、各部の結合の順序もこの通りとは限らない。

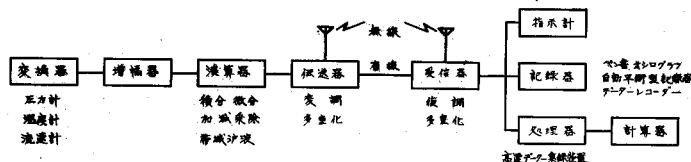


図-1 測定系の構成

2-2 測定器の性能

a) 精度 一般に測定器で測

定された値を被測定量の真の値に完全に一致させることは実際上不可能で、測定値と真の値との間には差があり、この差が誤差と呼ばれる。

$$\begin{array}{ccc} X & - & x \\ \text{測定値} & & \text{真の値} \end{array} = \begin{array}{c} \epsilon \\ \text{誤差} \end{array} \dots\dots\dots (1)$$

この誤差 ϵ が小さい程正確度 accuracy の高い測定である。

また、一定に保たれた測定量を同一の測定器で何回も測定すると、細かくみると測定値にばらつきを生じる。このばらつきの少ない測定を精密度 Precision が高い、または精密であるという。この正確度と精密度の両者の高い測定器を精度が高い測定器という。したがって、精密であっても正しい検定の行なわれて

*) このスペクトル密度を一様にする操作は、普通 prewhitening と呼ばれる。(Blackman & Turkey 1958)

ない測定器で測定された値は、精度は低い。ここに測定器の検定ということの重要性が生じてくる。すなわち、精密度の高い測定器の場合には正確な検定を行なって(1)式の誤差の値を定めておけば、

$$x = X - \epsilon \dots\dots\dots(2)$$

として測定値を真の値に近づけることができる。

測定器の精度を示すのに、その器械で測定できる全範囲 full scale に対して、その器械による測定で起り得る最大の誤差の百分率で与え、精度フル・スケールの何%と示す場合が多い。*)

測定器を選定する際、精度に関し注意すべき点を列挙すると、

(i) 測定対象に応じ必要な精度を有すること：精度の高い測定器は一般に高価で、取り扱いが面倒で注意して操作しないとかえって大きな誤差を生じるような場合もある。したがって、どのような性質の量、例えば、その量の大きさ、時間的、空間的な変化などをどれだけの精度で測定するかに応じて測定器を選定する必要がある。

(ii) 精度が一定に保たれること：使用状態や測定量の値によって精度が変化したり、時間的に精度が変化するようなものでは困る。

(iii) 誤差の原因がはっきりしていること：でき得れば測器の構造が単純で、主要な誤差の原因がはっきりしており、ある程度補正し得ること、あるいはその誤差の限界がはっきりしていることなどが望ましい。

一般に、測器の誤差の原因となるものとして、次のようなものがあげられる。

(i) 機械的かた back lash

(ii) 各種の摩擦

(iii) バネの変形が弾性変形の範囲を越える場合

(iv) 変換器を使用する場合には、物質の性質の変化、すなわち、経年変化(抵抗、圧電、磁歪、熱膨脹)増巾器を使用する場合には、

(v) 零点の変化 drift

(vi) 非直線性(電気回路の非直線による。)

(vii) 増巾度の時間的变化

(viii) 電気回路内部に生じる雑音 noise

最近の電気メーターなどではさまざまな工夫がされて(i)～(iii)による誤差の原因が極めてわずかになるような構造になっている。そして、精度に応じ0.5級とか0.2級とか各種の分類がなされている。しかし、一般の観測用の測器では(i)～(ii)が案外きいている場合が多いので注意が必要である。増巾器を内蔵する測定器の場合には、スイッチを入れた後、しばらくの間、特に(v)や(vii)がはげしいので、できるだけ安定した後使用することがのぞましい。このため、でき得れば、回路が安定する時間について一応確認しておく方

*) 測定の精度を示すのに測定値自体の大きさに対する誤差の比を用い、比正確度 specific inaccuracy と呼ぶ時もある。

がよい。＊)

b) 感度 被測定量 x の変化 Δx に対する測定器の指示量 y の変化 Δy の比 $\Delta y / \Delta x$ を測定器の感度と呼ぶ。高い精度の測定を行なうには、高感度の測定器を使用しなければならないが、一般の測定では必要以上に高感度の測定器を使用すると測定に時間がかかったり、非常に注意深い取扱いを必要としたりして、必ずしも得策でない。また、感度の高い測定器がかならずしも精度が高いとはかぎらないので、この点注意しなければならない。一般に、指示計、あるいは記録計の目盛は限られているので、感度をあげると必然的に測定範囲がせまくなる。

増巾器を使用する場合にも、感度をいくらでも増加させることはできないうで、増巾器内部の雑音、入力回路における各種の誘導雑音（注意しないとこれが案外大きい）、0 点の移動、それに加えて変換器部の機械的、あるいは温度の影響による誤差などのために限界が生じてくる。

従って、できれば、出力の大きい変換器を使用することが望ましい。

c) 応答（動特性） 変換部を測定環境に急に押入した場合、測定器が被測定量に対応した正しい値を示すまでには少し時間がかかる。また、一定値に達した後、一たん行き過ぎ over shooting をした後振動しながら一定値に漸近していく場合もある。この一定値に達するまでの時間を遅れ time lag という。また、応答 response の速さという言葉も使用される。同様なことは、被測定量が時間的に変動している場合にも生じ、このとき、測定器の示す値は一般にわずかの位相のおくれを生じ、振巾にも対応すり正しい値よりわずかのずれを生じる。

このような時間的遅れは、変換部が質量、あるいは熱容量を有する限り避けられず、電気回路においてもインダクタンスや容量のようなエネルギーを蓄積する性質の部品が用いられているかぎり、本質的には除き得ない性質である。しかしながら、この時間的遅れは、変換部ならびに電気回路の機構を適当に選ぶことによって、被測定量の変動の速さに対して無視できる程度にすることは可能である。被測定量の変動の速さに応じて充分に速い応答の測定器を使用することが必要である。

簡単に測定系の動特性を調べるには、何らかの方法で入力に階段的な信号 step function

$$\begin{aligned} x(t) &= 0 & t &\leq 0 \\ &= x_s & t &> 0 \end{aligned}$$

を入れて、出力信号の追従すなわち過渡応答を調べればよい。このとき、水銀温度計のような一階の線型素子、すなわち、入力 $x(t)$ と出力 $y(t)$ との関係が次の一階の線型微分方程式 $\tau \frac{dy}{dt} + y = x(t)$ で与えられるような素子の過渡応答は

$$y = x_s (1 - e^{-t/\tau}) = y_{\infty} (1 - e^{-t/\tau})$$

となり、図示すると、図-2 a のようになる。この τ は、時定数 time constant と呼ばれ、素子に

＊) 後述するデーターアンプなどでは、瞬時 ($100 \mu s$) に性能がほぼ安定するものもできている。

個有の常数で上式より出力が最終平衡値 y_{∞} の $(1 - e^{-1})$ すなわち、0.632 倍になるまでの時間に相当することがわかる。

また、ペン書オシログラフのように、入出力の関係が標準型で書くと

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \zeta \omega_n \frac{dy}{dt} + \omega_n^2 y = \omega_n^2 x(t)$$

ζ = 制動比、 ω_n = 素子の固有角振動数 ($= 2\pi f_n$)

で与えられる素子は二階の線型素子と呼ばれ、過渡応答は図-2 b に示されたようになる。制動比 $\zeta = 1$ はいわゆる臨界制動で、 $\zeta < 1$ は不足制動、 $\zeta > 1$ は過制動と呼ばれ、 $\zeta < 1$ のときには図-2 b にみられるように出力は少し行過ぎ over shooting を行なった後、最終平衡値に漸近して

いく。理論的に最も速く最終平衡値に達するのは臨界制動の場合であるが、後述する周波数応答をできるだけ広い範囲で近似的に一樣にするためには少し不足制動にして over shoot させた (2~3 % 程度) 方がよい。

周波数応答は上述のような線型の素子の入力に、種々の周波数の正弦的な信号を入れたときの応答、すなわち、入出力の振巾比と位相差の周波数に対する

関係を意味し、動特性を示すためにしばしば使用される。前述の一階線素子の周波数応答を図示すると図-3 のようになる。ここで利得は入出力の振巾比を位相角は入力に対する出力の位相のずれをそれぞれ意味する。横座標には入力の周波数に素子の時定数 τ を乗じて無次元化したものがとられている。2 階の線型素子の場合に

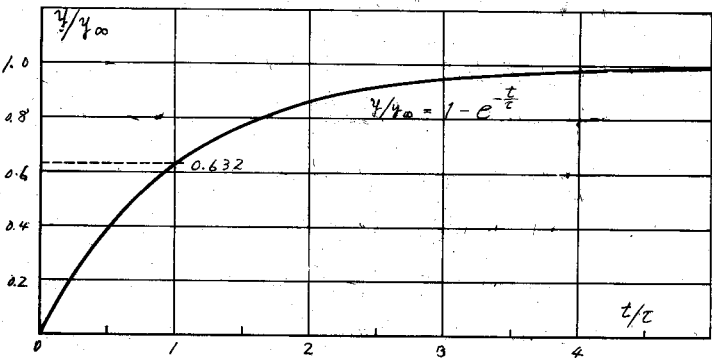


図-2 a 一階線型素子の過渡応答

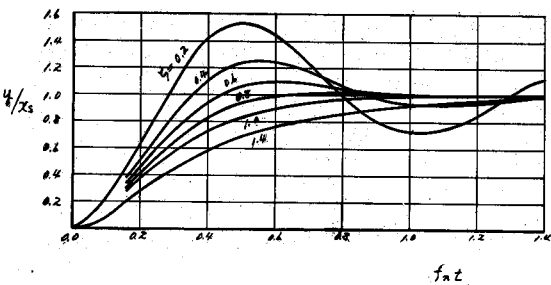


図-2 b 二階線型素子の過渡応答
 f_n : 素子の固有周動数

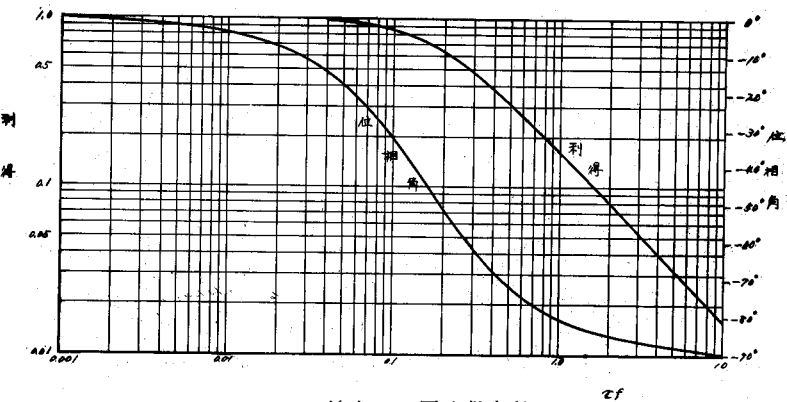


図-3 一階線素子の周波数応答

は、周波数応答は図-4 a b のようになる。この場合、横座標には入力周波数 f を素子の固有振動数 f_n で割って無次元化したものがとられている。図-4 a よりわかるように、周波数応答の利得のみについてみると、制動比が臨界制動より少し小さい時（例えば、 $\zeta: 0.707$ ）の方が特性が近似的に一樣な周波数範囲が広い。ペン書オツシログラフのように素子の固有振動数がそれほど高くない系では、できるだけ高い周波数の変動まで測定するために、一般に指定の制動は臨界制動より少し小さめにとられている。＊)

2-3 測定器に要求される事項

これは、別の面よりみれば測定器を選定する際の要点になるものである。

a) 性能 測定目的に応じて必要な性能（感度、動特性、精度など）を有すること、必要以上に高性能の測定器の使用がかならずしも得策でないことは、感度ならびに精度の項で述べたとうりである。

しかしながら、実際に測定器を選定する場合を考えてみると、必要な性能を決めるためには、被測定量の性質が、あらかじめある程度推定されていなければならない。

したがって、まったく見当のつかない性質の量を測定するためには、予備的な測定を行なって、概略の性質を把握したうえで、順次精度をあげていく方法が適切である。したがって、大規模な現地観測のように出直して観測することが困難な場合には、2段、3段がまえに測定器を準備しておくことも必要となる。

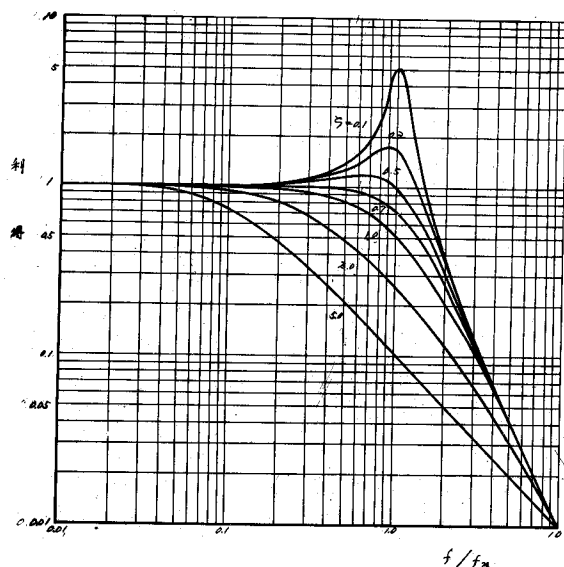


図-4 a 二階線型素子の周波数応答（利得）

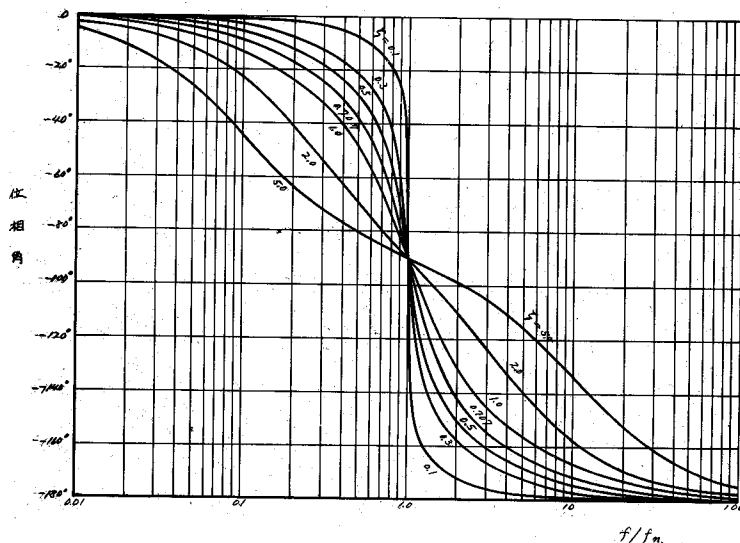


図-4 b 二階線型素子の周波数応答（位相）

＊) 2階の線型素子には、このほか、電磁オツシログラフ、あるいは各種の力学量の変換器（例えば、後述する弾性型の圧力変換器）などがこれに該当する。したがって、図-2 b あるいは図-4 a, b に示された応答特性はこれらの素子にも利用できる。

b) 堅牢性および耐久性 特に現地観測用の測定器では、このことが極めて重要である。船上などにおいては、あまり繊細な取扱いに困難であるので、手荒く取扱っても規定の性能がえられ、できれば間違った使い方ができないような構造(fool proof)になっていることが望ましい。また、測定器のとりつけ位置は海中であったり、海上の潮風にさらされる位置にあっては非常に条件が悪く、しかも、強力な波力が作用する場合もあるので、現地観測用の測定器では特に堅牢で耐久力のあることが要求される。耐久性を増すためには、単に強度のみではなく、腐蝕や摩耗をさげるために材料が適切に選ばれ、しかも、付着生物のつきにくいような塗料、その他が使用されていることなども必要である。

c) 使いよさ 測定器はあくまで現象を定量的に把握するための手段として用いるのであるから、できるだけ簡単に、しかも迅速に正しく使用できることが必要である。

d) 互換性 測定器の各部分はできるだけ規格、性能が統一されていて、互換性のあることが望ましい。これは、特定の測定器についてみると、万一その一部が破損したとき、修理を容易にするし、測定器を組合わせて使用する場合には組合わせを容易にする。最近、電気的な測定器が多く使用される傾向にあるのは、一度被測定量を電気量に変換してしまえば、各種の性能のすぐれた指示計や記録計を自由に選定できることもその理由の一つである。

e) 小型化 持ち運びの便もあるが、被測定量の場合をできるだけ乱さないで測定するためには、特に検出部は小型であることが望ましい。電子回路に関しては、最近ではモジュール化されたもの、さらにI.O化されたものなどが使用される傾向にあり、非常に小型化されつつある。このような傾向は高度に演算処理機能をそなえた小型の測定器の出現につながるようにもわれる。

3 測定器の構成要素各論

2-1において測定器を構成する基本的要素について全般的にのべたが、この章では、これら構成要素のうち最も基本となるものと考えられる変換器、増巾器、記録器についてももう少し詳しく述べる。さらに、最近非常に多く使用されるようになったデジタル型の計測器、および今後の計測システムをかなり大巾にかえつつあるデータ処理装置について述べる。

3-1 変換器および測定量の変換法

(1) 変換器 transducer

測定量を検出して表示あるいは記録するまでの過程では、一連の物理量の変換が行なわれるが、それらは便宜的に一次変換と二次変換とにわけて呼ばれることがある。一次変換とは、測定対象に直接接触して被測定量を他の物理量に変換することで、変換後の物理量としては、変位、圧力(力、トルク)、電圧(流)、インピーダンスなどの場合が多い。これらは処理の状況に応じてさらに相互に変換されて、最終的に指示、あるいは記録するための変位に変換される。このような一次変換以後の相互変換を二次変換と呼ぶ。例えば、ピトー管により流速を測定する測定系をとりあげてみると、図-5のようになる。ピトー管の部分で一次変換をおこない、それ以後の変換が二次変換に対応する。しかしながら、この区別は、便宜的なものであって

同一の変換要素が使用順序によって一次変換要素になったり、二次変換要素になったりする。

変換器 transducer は、本来は被測定量をそれと一定の関係にある他の量に変換する装置を意味するが最近、電気的計測が盛んになるにつれて、被

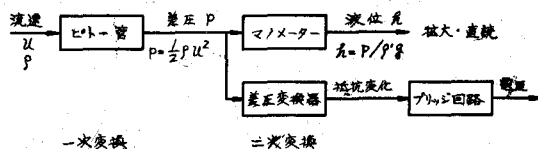


図-5 測定量の変換の例

測定量を電気量に変換する素子あるいは測定器の出力側で電気量を機械的な量に変換する素子の意味に使用されることが多い。特にオートメーションに関連した工業計測と制御、あるいは宇宙開発や海洋開発に関連した高度の計測などの必要性に応じて電気的な変換器に最近いちじるしい進展がみられ、それらは海岸計測にも次第に利用されるようになってきている。変換器をこのような狭い意味に解釈して、被測定量を電気量に変換する素子と考えると、変換器はなんらかの形で被

測定量を直接的に、あるいは一度変位に変換した後、次のように電気的インピーダンス（抵抗、容量、インダクタンス）か、起電力に変換するが多い。（図-6）

抵抗：抵抗線（抵抗温度計、熱線流速計）

ストレイン・ゲージ

ポテンシオ・メーター（各種の変位、ならび

に回転角変換器）

半導体（サーミスター温度計、ならびに流速

計）

容量：距離変化（変位、あるいは液位変換器）

面積変化（回転角変換器）

インダクタンス：

自己インダクタンス変化（変位変換器）

相互インダクタンス変化（変位変換器、例えば、差動変圧器）

磁歪現象（圧力変換器）

起電力：圧電現象（ピエゾ効果を利用した圧力変換器）

熱電対（熱電温度計）

光電気（ホトセル）

電磁誘導（流速変換器、例えば電磁流速計）

このようにして、被測定量を起電力に変換すれば、ただちに電圧として取り出すことが出来、電気的インピーダンスに変換しても、ブリッジ回路などにより、これまた容易に電圧に変換することができる。

変換はまた、使用目的別に分類される場合が多い。その各々について2～3の例を示すと表-1のようになる。このほか、力学的量を検出するためのものに加速度変換器、振動変換器などと呼ばれるものがあるが、

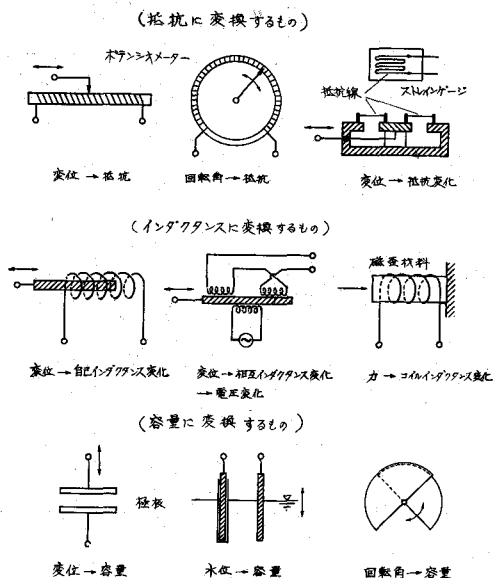


図-6 各種変換器説明図

表 - 1 各種変換器

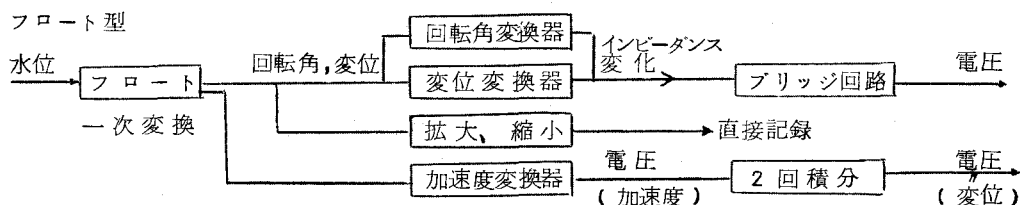
	型 式	変 換 要 素	変 換 関 係
温 変 換 度 器	抵 抗 型	金属線、半導体	温度→抵抗変化
	熱 電 型	熱電対、熱電素子	温度→起電力
変 位 変 換 器	ポテンシオメーター型	スライド抵抗	接点の変位→抵抗変化
	誘 導 型	差動変圧器、可変インダクタンス	鉄心の変位→インダクタンス変化
	抵 抗 型	ストレイン・ゲージ、半導体	抵抗線変位→抵抗変化
	容 量 型	コンデンサー	極板変位→容量変化
圧 力 変 換 器	上記の変位変換器は構造を少し変えることによってすべて圧力変換器として使用出来る。		
	圧 電 型	水晶、チタン酸バリウム、ロツシエル塩	圧力→電圧
	磁 歪 型	磁歪素子+コイル	圧力→透磁率変化→コイルのインダクタンス変化
	パイプロトロン	ダイヤフラム + 金属線	圧力→振動数変化
回 転 変 換 器 (回 転 角 回 転 数)	回転角変換器としては変位変換器 (ポテンシオメーター型、容量型) などを利用出来る。		
	発 電 型	直流あるいは交流発電機	回転数→電圧
	光 電 型	スリット、反射板+光電素子	回転数→電気パルス
	誘 導 型	トリガー・ビックアップ *	

原理的には変位変換器にほぼ等しい。

(2) 測定量の変換

1-3で述べたように海岸計測の対象はつきつめていくと、大部分は水位(波高、潮位)、圧力(水圧、気圧、波圧)、流速(潮流、海流、波による流れ、風)、温度(気温、水温)などになる。そこで、これらの量の測定を行なう具体的方法の概要を示して、そこで使用される変換器の役割を理解するとともに実際の測定器との対応を示す。また、これに付随して測定器の特徴についても述べる。

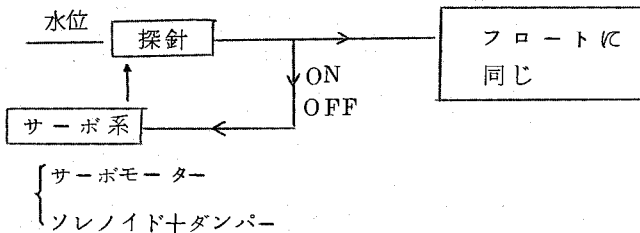
a) 水位の変換



*) 電磁誘導を利用したもので、回転軸にとりつけた永久磁石がサーチコイルを切る時に誘導する電気パルスとしてとりだすもの、回転軸の凹凸(ストリップ)が永久磁石にまかれた線輪の前を通過して線輪に誘導する電気パルスを検出するものなどがある。

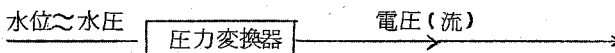
この形式の水位測定は、検潮儀、あるいは実験室用の波高計（比較的周期のおそい波用）などに利用される。一番下の加速度変換器を使用するものは、外洋における波の計測のように固定座標系を得ることが困難な場合、水面に浮び、波に追従するブイの運動の上下加速度を検出し、その信号を二度積分して相対変位として水面変動を測定する方法である。これらのフロートを使用する形式の測定では、一次変換を行なうフロートの大きさ、ならびに液面の変動に対する追従性能が測定の死命を制するので、波高計として使用する際にはあまり短周期の波に対しては使用することができない。しかしながら、検潮井戸に導かれた潮位の変化などはかなり高い精度で、しかも比較的簡単に測定することができる。

探針追尾型



この方式は、探針^{*}が水面に接触するとソレノイド、あるいはサーボモーターにより探針を引きあげる力が働き、逆に水面をはなれると逆向の力が働くようにして、絶えず探針が水面を境にして微小な振動を行ないながら水面に追尾して運動し、その変位をフロートの場合と同様な方法で検出するもので、実験室用の波高計や水位計として使用された例がある。この形式の測定は、サーボ系の追尾速度をあまり速くすることが困難であるので、フロートの場合と同様に比較的長周期の波の測定にしか使用できないが、フロートに比べて水に接する部分が非常に小さいので、極めて局所的な水位の変化を測定することができる。

水圧型

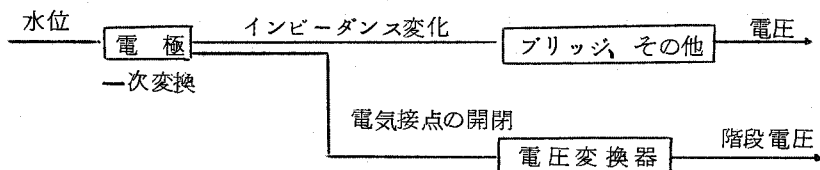


この方式は、表面の水位変化がそのまま静水圧として下方に伝わる場合に利用されるもので、潮汐や長周期波などの測定に用いられる。水圧式波高計も構造的には同様な方法によっているが、この場合には水位に対応する水圧というよりは水の波動運動による水中圧力の変動と表面水位の変動との関係（近似的には線型であるが、厳密には非線型）を利用している。したがって、短周期の波を測定する際には、変換器よりもむしろ、この圧力と表面水位との流体力学的な関係より様々な困難な問題が生じる。

圧力の変換器については後で述べるが、比較的安定したものが利用でき、しかも変換器を水中に固定して使用するので、波力の作用が小さいという利点もあって簡単な波高計として盛んに利用されている。

^{*} 探針の長さのわずかに異なったものを2本使用し、2本の探針の間に水面を絶えずはさむようにして追尾させる場合もある。

電 極 型



この方式は、水中に挿入された表面をコーティングした電極と水との間の電気容量が水位によって変化すること、わずかに離れた二本の導体電極間の電気抵抗が水位によって変化すること、あるいはまた、海水中に挿入された抵抗線が水によって短絡され、したがって抵抗値が水位によって変化すること(図-7)などを利用したものである。普通、電気容量型波高計とか、電気抵抗型波高計とか呼ばれるものはこの方式を利用したものである。

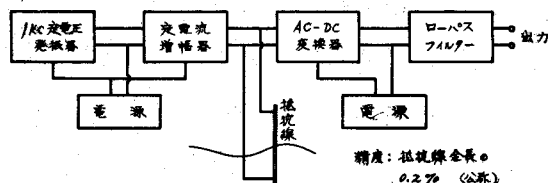
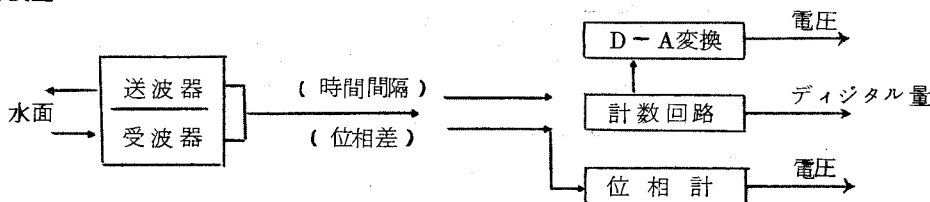


図-7 抵抗型水位計(Hytech 社・U.S.A)

この方式は水面が電極自体によってわずかに乱されること、わずかではあるが表面張力の影響を受けることなどを別とすれば、直接的に水位変化

を電気的処理の簡単なインピーダンス変化に変換するので、原理的には非常にすぐれた方法である。しかしながら、上述の2番目の水の電気抵抗を利用する方法は水の抵抗値が変化するとそのまま誤差となるし、他のものについても現地で長期間使用すると電極自体が付着物や付着生物の影響を受けるので問題がないわけではない。電気接点の開閉と書いた方式のものは、等間隔で電気接点を埋込んだ棒を水中に挿入した際、海水によって電気接点が短絡されることを利用したもので、接点の相続く開閉によって階段電圧を発生するような回路と並用して現地用波高計としてステップ式波高計、あるいは階段抵抗型波高などの名称で使用されている。この方式は電気接点の間隔で水位の分解能がおさえられる点を別とすれば、一種のデジタル型計測器と考えられるので、検定の必要がなく、精度が一定に保たれると云う利点を有する。しかしながら、電極型に共通した付着物や付着生物の影響はまぬがれることができない。このほか、電極型のものに共通した問題は少なくとも電極を支持できる支柱の必要なことで、水深の増大とともに実際に設置が困難となって来る。

超音波型



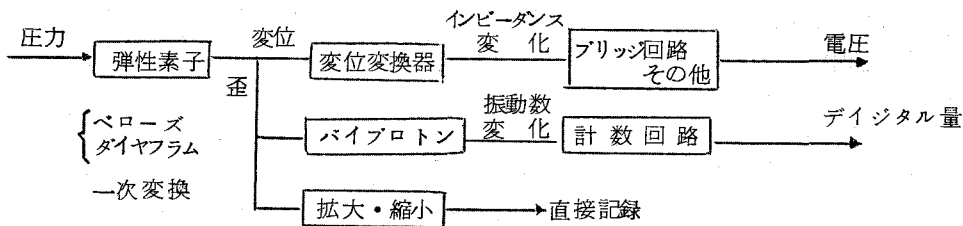
この方式は、空中、あるいは水中から水面に向って指向性の強い超音波を送って発射後水面から反射してくるまでの時間差を時間間隔、あるいは位相変化として検出する方法で、最近、波高計としてもかなり多く

使用されるようになってきている。これは原理的には音響測深儀と同一で、水底からの反射の換りに水面からの反射を利用したものである。超音波の換りに電波（即ちレーダー）を利用し、航空機上より海洋波の測定を行なった例もある。

水面に接触しないで離れた所から測定できる点は非常にすぐれているが、音波、あるいは電波のビームをあまり狭くしほることが困難な点、水面の傾斜があまりいちじるしい時には誤差を生ずる点など欠点がないわけではない。また、水中、あるいは空中の音速が測定に関係しているので、音速が変化すると誤差を生じたとえその変化を補正する回路をつけたとしても、水中型のものは水質が均一でないところでは問題が残る。

b) 圧力の変換

弾性型



動的な圧力を測定するために最も多く使用される方法は圧力をペローズやダイヤフラムなど（一次変換器）で受けて、弾性素子の変位として取り出し、その微小な変位を変位変換器で電気的インピーダンスの変化に変換する方法である。比較的小さい変動圧力の場合には、ペローズのかなり大きな変位として圧力を検出することができ、したがって、変位変換器として撓動抵抗などを使用することができる。しかしながら、非常に周波数の高い変動を検出するためには、可動部分の質量を極力小さく、バネ常数を極力大きくして、可動部の固有振動数を高くすることが必要である。このことは必然的に変位を微小にするので変位変換器として非常に高感度のものを必要とし、しかも変換器自体、あるいは弾性素子と変位変換器を結合した系の可動部の固有振動数が非常に高いことが要求される。この要求を満たすものとして、高張力で張られた薄いダイヤフラムの変位を固定電極との間の容量変化として検出する方法、ストレインゲージを使用する各種の方法、磁歪素子で力をうける方法などが使用される。海岸計測の場合には、測定の対象となる高い周波数の圧力変動は砕波が物体に衝突した時の圧力、すなわち砕波圧程度であるので、周波数特性の点ではあまり困難はない。ただし、変換器の構造上適当な制動を与えることが困難であるので、変換器の固有振動が誘発される場合がある。これを防ぐには変換器の感度のゆるす範囲でその固有振動数を測定対象の圧力変動の振動数よりもできるだけ高くすること、記録計の周波数特性を適当に組み合わせ総合周波数特性として改善するなどが考えられる。＊)

バイプロトン vibrotron というのは、ダイヤフラムと固定端との間に張られ直流磁場内で振動する細いタングステン線の固有振動数が線の張力変化によって変えることを利用したもので、次のような過程で

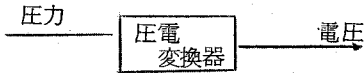
＊) 例えば、合田良実；衝撃荷重の測定について、港湾技術研資料/633、1967

圧力を周波数変化に変えるディジタル型の変換器である。

圧力変化→ダイヤフラムの変位→タングス線の張力の変化→固有振動数の変化→電気的周波数変化

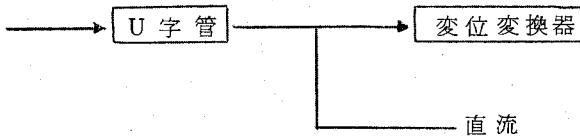
この変換器の特徴として、性能の安定性、分解能の高さ、耐久性などのほか、ディジタル量として計測できるので、データー処理の面ですぐれている。しかしながら、温度変化の影響を完全に補償することはなかなか厄介である。

圧電型



圧電変換器は、水晶、ロッシェル塩、チタン酸バリウム、テタニウム酸ジルコニウム鉛などのように圧力を加えることによって生じる分極電位により起動力を発生するいわゆる圧電体を使用した変換器で、圧力を直接に電気量に変換することができる。これらは非常に変位が少なく、高感度で、しかも固有振動数を極めて高く保ち得るので、非常に高い周波数の圧力変動の測定に適している。しかしながら、圧電素子の内部インピーダンスが非常に高いので、この起動力を増巾するための増巾器の入力インピーダンスが極度に高いことが要求される。^{*} もしも、これが低いと漏洩電流のため低い周波数側で特性が低下し、静的な圧力に対しては零となる。したがって低い周波数の圧力変動の測定にはあまり適さない。

マノメーター型



静的な圧力、非常にゆるやかな圧力は勿論、U字管マノメーターにより液位に変換されるが、振動その他の影響を受け易いので現地用の計測器には適さない。

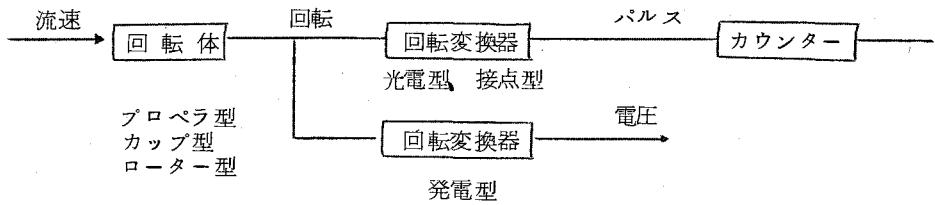
c) 流速の変換

動圧検出型

これは図-5に示したようにピトー管により動圧を差圧として検出し、マノメーターで読み取るか、あるいは差圧変換器でインピーダンス変化に直し、最終的に電圧として記録する方法である。図-5の過程で変換された出力電圧は、流速の二乗に比例していて不便であるので、最近は開平演算器を使用して流速と出力電圧とが直線的な関係になるようにしたものもある。流向のあまり変動しない比較的定常的な流れを測定するには、すぐれた方法であるが、あまり速い変動の測定には不向きであるし、逆流の測定ができないこと、圧力変動との分離が困難な場合があることなどの不利な点もある。

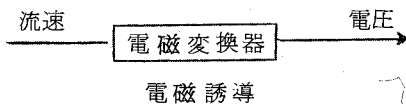
＊) このため圧電素子の次にはインピーダンス変換器として、カソードホロワー回路が一般に使用される。

回転変換型



この方法は、カップ型やプロペラ型の風(流)速計として、気象観測ならびに海洋観測においてもっとも多く使用される方法で、カップやプロペラによって流速を回転数に変換し、各種の回転変換器を用いてパルス数、あるいは電圧として検出するものである。この場合、回転変換器にはそれほど本質的な問題はないが、一次変換器であるカップやプロペラの部分には多少問題がある。カップ型風速計は細かくみると風速と回転数の関係がわずかに直線よりずれていること、気流に乱れがあると正しい平均流速よりわずかに異った値を与えることなどである。プロペラ型のもは直線性の点では非常にすぐれており、非常に低風速より回転するものも製作されている。しかしながら、プロペラ型のもは流向がいちじるしく変動する場合には問題で、普通現地計測用のものは風(流)向に向くような構造になっているが、変動がはげしい時には問題が生じる。この点、カップ型、あるいはローターを使用するもの(例えば、Savonius 型)は少なくとも水平方向には無指向性であるので、別に風(流)向を応答の速い風(流)向計で検出すれば問題が少ない。また、これは相方に共通しているが、風速の変動に対する応答はそれ程速くないので平均流を測定するのには適しているが、乱れなどの測定は困難である。

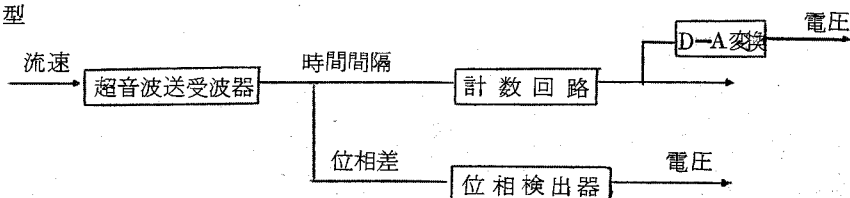
電磁変換型



この方法は、導体が磁場を切って動くとき、磁場に直角方向に電位差が生じるいわゆるファラデーの法則を利用したもので、流速に比例した電圧を得る非常にすぐれた方法である。流体の温度、圧力、粘度、混合物などの影響を受けない点も非常にすぐれており、工業計測においては高精度の流速計として使用されている。同様な原理にもとづく海洋計測器としてG・E・Kがある。これは地球の磁場を切って流れる海流に生じた起電力を二つの電極で検出して流速を測定する装置である。しかしながら、電磁型流速計で水中の局所的な流速などを測定するとなると問題が生じる。それは、変換器自体がかなり大型となり、たとえば小型化しても流れの場を乱し難いような構造にしにくい点である。それと、指向性の問題がこの場合も介入してくる。

しかしながら、海洋計測器としてまだ十分に検討されていないので、今後開発の余地があるように思われる。

超音波型



この方法は、音速が一定であれば二点間を超音波が伝播する時間が流体の運動によって変化することを利用したもので、最近かなり多く使用される傾向にある。図-8はその原理を原理を示したもので、二組の送受波器を図のように配置すると各組間の音波の伝播時間 t_1, t_2 はそれぞれ、

$$t_1 = l / (c + u), \quad t_2 = l / (c - u)$$

$$\text{したがって } 1/t_1 - 1/t_2 = 2u/l \dots\dots\dots (i)$$

$$\text{あるいは } t_2 - t_1 = 2lu / (c^2 - u^2) \div 2lu / c^2 \dots\dots (ii)$$

の関係が得られ、

(i) の関係を利用すると音速に無関係に u が測定できる。

(ii) の関係を利用すると音速が関係するので音速の変化を補正する必要がある。

この測定法の利点は可動部がないのでかなり速い変動流まで測定できる点である。送波器と受波器間の間隔で測定できる乱れのスケールは制限されるので非常に細い乱れのスケールまで測定することは困難である*) が現地用の風(流)測計としては非常に高い周波数成分まで測定が可能な測定器といえる。このほか、流速の成分が測定できるので方向の異ったものを数組組み合わせることによって流速ベクトルを測定できるのもこの方法の利点である、

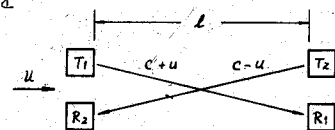
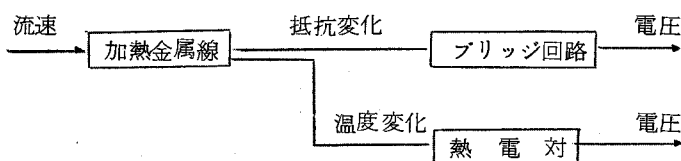


図-8 超音波風速計の原理

C : 音速 u : 流速
T : 送波器 R : 受波器

熱線型



この方法は極めて細い加熱された金属線の温度が流れによって熱をうばわれて変化し、したがって、抵抗値が変化することを利用したもので、熱線型風速計として気流の乱れを測定するため古くより実験室で使用されている。また、熱線に小さな熱電対を溶接して、直接温度を電圧に変換した例もある。非常に細い(実験室の場合、 5μ 程度を使用)タングステン線などを使用すると極めて高い周波数成分まで(例えば、 $0 \sim 20\text{KHz}$)乱れの測定が可能である。具体的な測定回路には種々のものがあるが、最近では、図-9に示す

*) ソビエトでは送受波器の径がそれぞれ 2mm でその間隔が 25mm といった極めて微小なものが使用され大気の流れをかなり高い周波成分まで測定した例もある。

ような定温度型（定抵抗型）が多く使用されている。すなわち、熱線の加熱温度を風速にかかわらず一定に保つようにブリッジ回路と広帯域直流増巾器によるフィードバック回路により加熱電流を自動調節するとき、加熱電流（電圧 V ）と風速 u との間に次の一定の関係があることを利用している。

$$V^2 = V_0^2 + K \sqrt{u}$$

V_0 : $u=0$ の時の電圧 K : 常数

しかしながら、上記のように加熱電流（圧）と風速との関係は直線的でないので、最近はこの関係を直線化するためのアナログ演算回路が並用される場合が多い。また、同種のものは水中でも比較的低流速（20 cm/s 以下）で使用されている。

極めて高い周波数成分まで流速変動を測定できる点では最もすぐれた風速計であるが、現地計測の立場からすれば、多くの問題が残されている。温度補償がやっかいなこと、線が破損し易いこと^{*}）性能を長時間安定に保ち得ないこと、したがって、たえず検定しないと精度が悪いこと、使用法にかなり注意が必要なことなどである。この測器は数々の利点はあるが、現地で使用する際には特殊な研究用にのみ使用した方が無難であろう。

トレーサー法

この方法は、大型のトレーサーとしては水面浮遊物、中立ブイなど、微視的なトレーサーとしては熱パルス、塩水滴、放射性物質などの流水中における運物を追跡することによって流速を測定するもので、極めておそい流れなどの測定に適しているし、流速の一種の絶対測定法とも考えられる。前者は海洋観測でよく使用される方法であり、後者は主に実験室で使用される。熱パルス、あるいは塩水法の欠点は、パルスの波形が流下とともにくずれてくるためその正確な検出が困難になる点であるが、最近には関連技術の進歩とともに新しい角度から検討が進められている。^{*}） また、最近、室内実験室で非常に多く使用される水素気泡法、hydrogen bubble 法も一種のトレーサー法とみなすことができる。

3-2 増 巾 器

各種の被測定量を電氣的に計測しようとするとき、変換器よりの出力が、記録器を動かせるに充分でない場合が多く、インピーダンスの整合も適当でない例が多い。このため、下記のような組合わせて、多くの場合増巾器が使用され、変換器よりの電気信号を記録器、あるいは指示計を作動させるのに適した形に増巾変

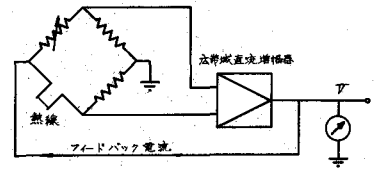
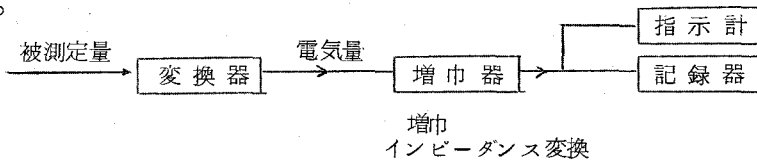


図-9 定温度型熱線風速計の原理

＊）この欠点、その他を改善するために、各種の形状のセラミックに細い金属線をコーティングしたホットフィラメントと呼ばれる素子も使用されている。

＊＊）離れた二点にある検出器で検出されたトレーサーによる信号の相互相関係数を求めることによって流速を測定する方法が研究されている。

換する。



したがって、変換器、および記録器、あるいは指示計の種類、ならびに、取り扱い信号の性質に応じて様々な性能の増巾器が必要となる。

(1) 増巾器の種類

電子工学的な細い分類は一応さしおいて、主として、使用する立場から増巾器を分類すると次のような分類が一つ考えられる。

電圧増巾器、電流増巾器、電力増巾器、電圧増巾器 voltage amplifier は電圧を大きくすることを主とするもので、使用頻度が非常に多く、変換器の出力が電圧で記録器の入力も電圧を必要とする場合に使用される。電流増巾器 current amplifier は、電流を大きくすることを主目的とするものであるが、海洋計測の場合に使用される頻度は比較的少ない。電力増巾器 power amplifier は、特に出力電力を大きくするように動かせる増巾器で、例えば、ペン書オシログラフのようにそれを駆動するのに大電力を要する記録器に結合する場合に使用される。しかし、多くの場合、指示計や記録器を駆動するには、かなりの電力を必要とするので、多段増巾回路の最終段には電力増巾回路が使用されている例が多い。

増巾器のもう一つの分類は、増巾する信号の周波数帯域によるもので、直流的な信号から増巾できる直流増巾器 dc amplifier と交流のみを増巾できる交流増巾器 ac amplifier とに大別される。交流増巾器の中にも極めて周波数の低い信号（例えば、 1 c/s 以下）から増巾できる超低周波増巾器から、非常に高い周波数（数 10 MC 、数 100 MC 、それ以上）を増巾する高周波増巾器まで種々のものがある。しかしながら、海岸計測で主な測定の対象となる地球物理学的な現象はほとんど直流的ともみなせる極めて周波数の低い変動からせいぜい数 100 c/s までの例が多い。したがって、多くの場合直流増巾器が使用されるので直流増巾器について少し詳しく述べる。

(2) 直流増巾器*

直流増巾器を更に増巾方式の差によって細分すると次のようになる。

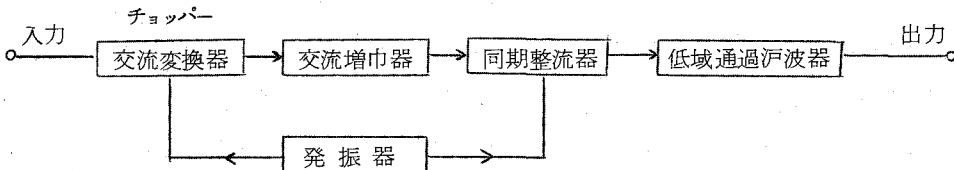
- A 直流増巾器
 - i) 直結型増巾器 direct-coupled amplifier (多くの場合、差動型増巾器 difference amplifier)
 - ii) チョッパー型増巾器***) chopper amplifier
 - iii) 複合型直流増巾器
- B 演算増巾器 operational amplifier

*) 更に詳しい内容に関しては例えば、電子回路ハンドブック（丸善）などを参照されたい。

**) 一般的な変調型増巾器の一種とみなされる。

支流増巾器では各増巾段間の結合が C-R.あるいはトランスなどを介して行なわれているので、直流電圧を増巾することができない。これに反して、直結型増巾器では、これらの要素を介さないで各増巾段が直接に結合されているので、この名で呼ばれ、直流からかなり高い周波数まで（例えば0～10MC）増巾することが可能である。しかしながら増巾できる周波数帯が0までのびていることは、増巾器内の雑音、真空管あるいは半導体を含む回路要素の時間的変化、電源電圧の変動など様々な原因で不安定が生じ、交流増巾器ほどには増巾度をあげることができない。最近では、いろいろと性能を安定化させるためのすぐれた手段が考えられ、90 db（約 3×10^4 倍）程度の増巾率 gain を有する直結型増巾器も普通に市販されているが、長時間このような増巾度で使用することは困難で、差動増巾器の上等のもでも長時間安定に使用できるのは60 db（1,000 倍）程度である。

チョッパー型の増巾器は、直流的な信号を回路の機械的な断続（機械的 チョッパー 使用）、あるいは電気的な方法（半導体チョッパー等）で交流信号に一度変換して、交流増巾回路で増巾した後、同期整流して、平滑し再び直流的な信号に直してとり出す型式の増巾器である。



この型式のものでは、増巾度は極めて高く、普通市販されているものでも $1\mu V$ 程度の入力信号の増巾が可能で特に高感度のものでは $10^{-8}V$ 以下の電圧まで増巾できる。ただし、チョッパーの断続周波数すなわち搬送波の周波数（多くの場合数100 $\frac{1}{s}$ 、～数1000 $\frac{1}{s}$ ）と整流平滑回路の時定数とに制限されて周波数帯域をあまり広くとることができない。普通のもので0～数100 $\frac{1}{s}$ で一様な周波数特性を有している。また、チョッパー型増巾器では、中間で交流増巾を行なうので、段間結合にトランスを使用することによって、入力と出力とを直流的に切り離すことができる利点を有する。

複合型増巾器は、直結型増巾器の多少不安定な欠点はあるが、広帯域を有する利点と、周波数帯域は狭いが非常に安定で高利得なチョッパー型増巾器を組合わせたもので、両者を並列に使用したものや、直結型増巾器の不安定性を高感度チョッパー増巾器で安定化したもの *chopper stabilized amplifier* などがあり、次の演算器増巾器などで使用されている。

演算増巾器 *operational amplifier* は高感度直流増巾器の一種であるが、各種のアナログ演算（例えば、加、減、乗、除、微分、積分等）を行なう素子として使用するために設計されたもので極めて小型^{*)}のものが市販されている。これらを利用すると、各種の演算回路を容易に構成することができるので、今後、計測の分野で使用される頻度が增大するものと思われる。このほか、最近、データアンプ *data*

*) トランジスターを使用したもので、マッチ箱大でIC化されたものは更に小さい。

amplifier と呼ばれる直流増巾器が市販されている。後述するデーター集録装置のプリアンプなどに使用されるもので増巾度は1,000倍程度(0~1,000倍 ステップ可変)であるが、非常にすぐれた性能と安定性を有している。

例 周波数特性 0~15 KC (± 1 dB)

増巾度の精度: $\pm 0.02\%$ (25°Cにおいて)

直線性: 0.002% (増巾度 1,000倍)

零点変動: $5\mu\text{V/day}$ 安定化時間: 100 μs (最終安定値の0.01%以内)

(3) 増巾器の測定

市販の増巾器のカatalogには仕様として次のような事項が一般に示されている。増巾度(利得、あるいは測定電圧)最大出力、周波数帯域、入力抵抗(インピーダンス)、出力抵抗(インピーダンス)、安定性(電源電圧変動に対するもの、トランジスター型のは温度変化に対するもの、あるいは零点の時間的変動)、雑音、直線性、その他電源、形状寸法等。

我々が計測器の一部として増巾器を選定する場合を考えると、まず測定量を検出するに十分な性能(形状寸法、周波数特性等)を有する変換器がきまり、次に測定しようとする現象の変動周波数ならびに記録後のデーターの処理方式によって測定器の最終段である記録器が定まる場合が多い。記録器が定まるとそれを駆動するのに必要な電気入力がかまり、さらに、増巾器の後に接続される負荷抵抗がかまってくる。したがって増巾器としては少なくとも現象の周波数帯域より少し広い周波数特性を有し、記録器の入力抵抗よりも少なめの出力抵抗を有し、必要とする電力がその最大出力以上であるようなものを選定することになる。一方、変換器の出力電圧(または、電流、あるいは電荷)と記録器の感度とより増巾器に要求される増巾度がきまり、さらに増巾器の入力抵抗は変換器の内部抵抗よりかなり高いことが一般に要求されるので入力抵抗がかまってくる。さらに、測定の精度によって、直線性が測定の継続時間によって安定性が決ってくる。

最近、エレクトロニクス技術のめざましい進歩とともに、増巾器の性能は飛躍的に向上してくる。そして、目的に応じて非常に使用し易く、性能の安定した規格化された製品が市販されつつある。一方では、製品の小型化とともに、一般の計測においては増巾器は単体としてよりも変換器や記録器の中に組込まれて使用される傾向にある。

この他に、特に現地計測の場合には、充分なAC電源が使用できない場合が多いので、消費電力の少ないもの、できれば直流電源(電池)で作動できるものなどが必要になってくる。しかしながら、一般に市販されているものではこれらの要求を満足するものは極めて少ないので、結局特別に製作するか市販の増巾器を電池で駆動しなければならないときにはインバーターを使用して交流100V電源をつくり出すことになる。

3-3 記録器

多くの場合、海岸計測においては測定量の連続自記録が必要となるので、さまざまな形式の記録器が使用される。記録器といっても非常に広範囲にわたるが比較的海岸計測に関連のあるものだけ述べる。

(1) 記録電流計

記録電流計は図-10に示されたように、普通の直流電流計の指針の先端にペンをつけインクを供給し、その運動を記録紙に描かせるようにしたもので、記録紙はペンの運動と直角の方向に一定速度で走行するように巻取装置と時計装置とがそなえられている。ペンの応答がおそいので極めてゆるやかな変動しか記録できないが、比較的簡単な構造を有し、安価で使用しやすい利点がある。記録紙の送りが手巻時計で一週間程度維持できる点は電源になやまされる現地計測においてはある程度利用価値があるが、上述のように速い変動の記録には不適当である。

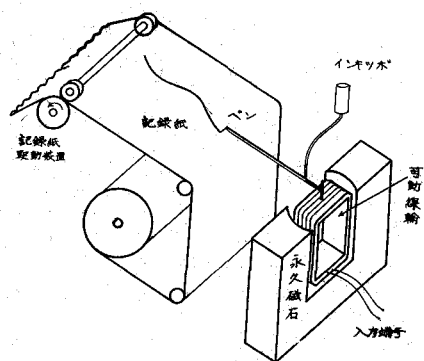


図-10 記録電流計原理図

(2) ペン書オッシログラフ

ペン書オッシログラフは前述の記録電流計の一種とみなされるが、記録計の運動部分の慣性を減じ、バネを強化し、適切な電磁的な制動をかけるなどして応答特性をいちじるしく改善したもので、普通0から100 $\%$ 程度までほぼ一様な周波数特性を有している。またペンの駆動部が小型化され、多要素のものが製作されている。さらに、最近では種々の改良が行なわれ、ペンの円弧状の運動を直線的な運動に変換するようにしたもの、増巾器を組込んだものなど、非常に使い易くなっている。ただし、非常に精密な測定を行なうにはペン書オッシログラフの精度はそれほど高くない（普通精度2.5%程度）ので注意しなければならない。[※]また、接続する電気回路（例えば、増巾器）の出力インピーダンスをガルバノメーターに指定された値に合わせないと制動が不適切になって規定の周波数特性を示さない。

(3) 電磁オッシログラフ

電磁オッシログラフでは、ペンの代わりに光の細いビームによって感光紙に記録を行なうので、可動部の慣性が少なく、しかもペンと紙との間にあったような摩擦もないので、応答を非常に早くすることができる。ガルバノメーターの種類によって異なるが普通0～300 $\%$ の範囲で一様な応答のものが多く使用され、高い周波数特性を有するものは、0～3,500 $\%$ の範囲でほぼ一様な応答を示す。ただし、周波数特性が高くなるに従って感度が極めて低くなるので駆動するに比較的大電流（100mA程度）を必要とすることになる。また、内部抵抗が一般に極めて低い（10～100 Ω ）ので普通の増巾器と結合する場合には、出力抵抗が低く比較的大電流のとり出せるものが必要である。最近では、写真の現象処理を行なわないでも直接に記録のとれる非常に使いやすいものが、ビジグラフ、ビジコーダー、フォトコーダーなどの名称で市販されている。使用に際して注意しなければならない点は、電磁制動のものでは制動抵抗を規定通りにしないと周波数特性がいちじるしく異なること、過大電流を流すと線輪を焼切るおそれのあることなどである。広い周波数範囲にわたり精密な測定を行なう際にはできれば周波数特性を検定することが望ましい。

※) もっとも一般の現地計測では、変換器を含む測定系の精度は多くの場合数%程度であるので、あまり問題にならない。

(4) 自動平衡型記録計

前述の各種のオツシログラフのような変位法 deflectional method の記録器に比較して、かなり異った測定方式である零位法 null method にもとづき、数々のすぐれた特徴を有する記録器に最近非常に多く使用されるようになった自動平衡型記録器 servo recorder がある。偏位法は被測定量を次々に物理的な方法で変換してゆき、最後にはスケールに相対的な指針、あるいは記録ペンの偏位として測定する方式である。これに対して、零位法はその大きさを精密に調整できる既知の正確な量を別個に用意して、既知量を調整して未知量にバランスさせ、その時の既知量をもって測定値とする。簡単な例では、質量を測定する際に、バネ秤によるものが偏位法に相当し、天秤によるものが零位法に相当する。^{*} 電圧測定の場合では、零圧計によるものが偏位法、電位差計によるものが零位法に相当する。

零位法では、比較のために用いられる既知量として正確なものを使用し、未知量と既知量との比較を非常に高感度で行なえば、測定の精度を極めて高くすることが容易であるし、測定対象の場をあまり乱さないで測定が行なえるのも利点である。

自動平衡型記録計は、図-11 に示されたように、一般に直流電位差計 self-balancing potentiometer あるいは直流ブリッジ self balancing bridge を内臓し、記録計入力における電圧変化、あるいは抵抗変化によって電位差計、あるいはブリッジに生じる不平衡電圧を検出して、これを零にするようなスライド抵抗のブラシを動かす操作を増巾器（普通、チョッパー型増巾器）と平衡電動機 servo motor を使用して自動的に行なうものである。

スライド抵抗のブラシには、指針、あるいはペンが付属していて、ブラシの移動を目盛上に指示、あるいは記録紙に記録する。この記録器の利点として次のようなものをあげることができる。

(i) 測定法が零位性であるため、精度が極めて高い。
規準電源、スライド抵抗に精度の高いものを使用し、高感度のチョッパー型増巾器を使用することにより、普通±0.5%程度の精度を有し、ペン書オツシログラフに比較すると、はるかに精度が高い。規準電圧を精密に分圧することによって測定レンジを切り換えること

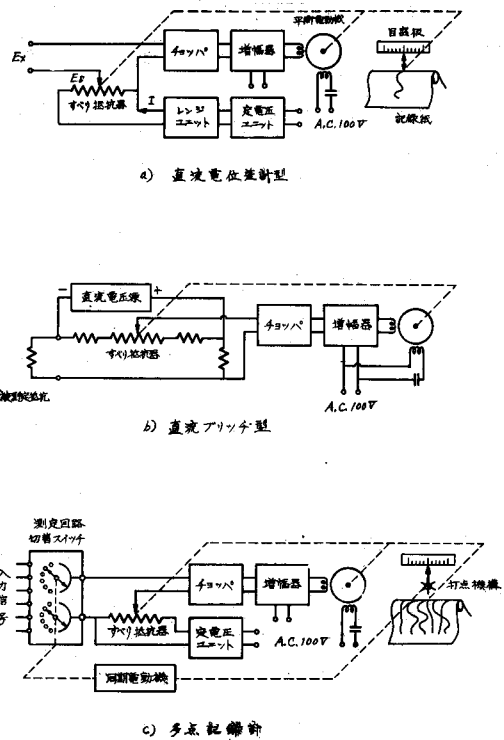


図-11 自動平衡型記録計

^{*} 天秤では、最後のわずかの質量の差を指針の振巾で読取る点で厳密な意味の零位法とは少し異っているが、完全に釣合のとれた場合を考えると零位法である。

も比較的容易である。

(㉔) 指針、ペンなどを駆動するトルクが大きく堅牢である。指針やペンの移動は強力なトルクを有する平衡電動機によって行なわれるので、ペンと記録紙の間の摩擦や外部振動によって指示が影響をうけにくい。

(㉕) 任意の目盛りをとることができる。例えば、スライド抵抗の長さと抵抗との関係を適当な函数関係にあるように設計することによって変換器の出力における非直線性を直線化して直線目盛に直すこともできる。

この他にも数々の性能上の利点を有し、機構としても多数組のペンを有する多ペンレコーダー、入力を次々に切換えると同時にペン自体も切換え(色の異なったペン) — この記録系で多数の量を断続的にではあるが記録できる打点型の多点記録計(図-1.10参照)などがある。

このように非常に多くの利点を有するが欠点は応答がそれほど速くないことで、市販されているもののうち、応答の非常に速いものでもペンがフルスケールを移動するのに0.2sec程度要する。自動平衡型記録計は工業計測器の一部として非常に多くの機種が開発され、しかも多くの場合変換器(測温体、圧力計、流量計等)組合わされるようになっているので、変換器がきまってくるとそれに応じて記録計の種類も定まってくる。もちろん、直流電位差計型のもは信号が直流電圧であれば独立に多目的に使用できる。

X-Yレコーダー これも自動平衡型記録計の一種であるが、普通の記録計のように記録紙を一定速度で移動させてX軸を時間軸とするのではなく、2組のサーボ系によってペンが記録紙上をX方向およびY方向にそれぞれ独立に移動するような機構になっている。もちろん、一方に時間とともに直線的に変化する電圧を入れてやれば時間軸とすることもできるが、X軸とY軸にそれぞれ時間的に変化する電圧、 $x(t)$ と $y(t)$ を入れてやると、記録紙上に両者の関係を示す $y = f(x)$ なる曲線が記録される。

(5) データレコーダー

後述するように最近データーの自動処理が盛んに行なわれるようになって、測定記録を電圧変化として容易に再現できるデーターレコーダー data recorder の必要性が非常に増大している。データーレコーダーは普通我々が会話の録音などに使用するテープレコーダーと原理的には同様なものであるが、定量的な測定データーを高精度で記録しなければならないので、普通のテープレコーダーに比較するとはるかに精密な機構と性能とを有している。

データーレコーダーの利点としては次のような点をあげることができる。

(i) 時間的に変化する電気的信号をそのまま記録でき、しかも周波数特性が各種のオシログラフなどに比べて非常にすぐれている。

(ii) 記録されたものはそのまま、必要な時、なんどでも再生でき電気信号としてとりだしうる。

(iii) 記録時と再生時とのテープ速度を変えることによって非常に長時間の記録を短時間で再生して処理したり、逆に非常に速い現象をゆっくりと再生してその細部を詳しく調べることができる。

(iv) 記録ヘッドと再生ヘッドとの間隔を調整することによって信号の任意の遅延をおこなうことができる。これは自己相関係数の測定などに利用される。

(v) 不必要な信号は消去して同じテープを何回も使用することができる。

このように非常に多くの利点を有するので今後ますます利用される頻度は増大するものと思われるが、必ずしも欠点がないわけではない。何よりも困る点は記録を直接目で見ることができない点で、うっかりすると記録したつもりで何も記録されていなかったり、いちぢるしく雑音を含んだ記録をとっていたりすることもおこりうる。したがって、記録と同時に一部再生してオシログラフに記録するか、あるいはシンクロスコープで観測しモニターすることが望ましい。

a) データレコーダーの種類 記録方式の差によってデータレコーダーを分類すると次のようになる。

直接記録方式 direct recording
 変調記録方式*) { 周波数変調記録方式 (F.M) frequency modulation
 パルス幅変調方式 (P.W.M) pulse width modulation
 デジタル記録方式 (P.C.M) pulse code modulation

直接記録方式は普通の音声のテープレコーダーと同じ記録方式で、入力電気信号に比例した強さで直接に磁気テープが磁化され半永久的に記録される。しかしながら、再生電圧は磁束が再生ヘッドのコイルを切る際、磁束の変化に比例して発生するので(微分特性)完全な直流分は再生できないし、交流成分でも周波数の低い所ではヘッドに再生される電圧は低下する。周波数による再生電圧の変化はそれと逆の周波数特性を有する電気回路によって補償し、ほぼ平坦な総合周波数特性が得られるようにしてある。しかし、なんといっても直流成分が記録できないことは、データ記録装置として困る場合が多いし、精度の点でも直接に増幅器の増幅度の変動などが出力の大きさにきいてくるので後述する変調方式に比べれば劣る。ただし、利点としては、変調方式に比べてはるかに高い周波数まで記録することができるので(例えば数100KC)変調方式で記録が困難な高い周波数領域の信号の記録にはしばしば使用される。

周波数変調方式(F.M)は搬送波を入力信号で図-12に示されたような仕組で周波数変調する方式で、データレコーダーでは一般によく利用され、最も性能のよい記録方式の一つである。この方式では、入力の信号電圧はその電圧に比例して搬送波の周波数のその中心周波数からの変化として記録されるので、もちろん直流成分の記録も可能であるし、直接記録方式のようにレベル変動の影響をうけないというすぐれた利点を有している。**)

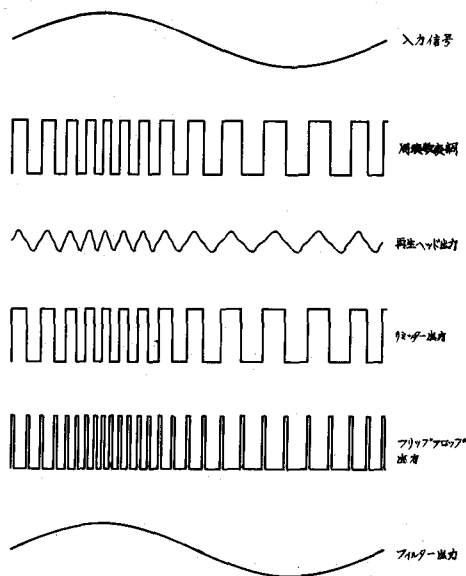


図-12 FM変復調変換過程

*) このほか振幅変調方式(A.M)もあるが精度がそれほどよくないので最近あまり使用されない。

**) 再生信号の振幅にレベル変動があってもリミッターで振幅を一定におさえてしまうので、レベル変動の影響を受けない。F.M放送で雑音が少ないのと同じ原理である。

この方式にとって最大の難点は、テープの速度にむらがあると直接雑音となってあらわれることである。すなわち、再生信号の周波数はテープの速度に比例しているので、テープ速度が不規則に変動するとそのまま周波数の不規則な変動となり、周波数の変動はそのまま記録信号に直接影響し、雑音となって出力に出てくる。したがって、計測用のデーターレコーダーでは、このテープ速度の不規則な変動を防ぐために様々な補償が考えられ、極力小さくなるようにしてある。^{*}

同一の磁気テープに各種のデーターを同時に測定する必要があるので、一般に記録ヘッドを多量にして、磁気テープ上に何列もトラックを作って記録するようになっている。普通のもので6.3mm幅テープで4トラック、12.6mm幅のテープで7～8トラックとなっている。

データーを多量に同時に記録する方法としては、この他に多重記録ということも行なわれる。これは磁気テープに記録できる周波数範囲で幾つかの異なった中心周波数の搬送波を選び、それらを別々にそれぞれの入力信号で周波数変調した後、混合して一つの磁気テープトラックに記録する。そして、再生時にはバンドパスフィルターによってそれぞれの搬送波を分離し、別々にとりだす。

パルス幅変調方式(P.W.M)は入力のアナログ電圧に比例した幅を有するパルスを作り、これを記録する方式で、直流成分から記録することができる。また、ヘッドからの再成波形の振幅変化や波形のひずみは出力波形に影響がないし、ワウ・フラッターの影響も比較的少ない。比較的低い周波数領域の信号の記録にはしばしば利用される。この方式でもF・M方式と同様に多重記録が可能である。

ディジタル記録方式は、以上の方式とは全く異なった記録方式であって、入力のアナログ信号をA-D変換器で

ディジタル量(後述)に変換して、ディジタル量(数値)に対応したパルスの配列として記録するもので、精度の点では最もすぐれたものである。しかし、これについてはディジタル計測器のところで改めてのべる。

b) データーレコーダーの選定 データーレコーダーを選定する際、最初に問題になるのは、記録する信号の周波数帯域である。一般に、データーレコーダーに記録できる周波数帯域が広がるにつれてテープ速度が速くなるので、テープ長さあたりの記録時間が短くなる。したがって、おそい変動を長時間記録するには、その変動波形をそこなわない範囲内でテープ速度のおそいものが得策で、周波数が高くなるにつれてそれに応じた周波数特性のものを選べば良い。次に問題となるのは、同時に記録できるチャンネル数であるが、可搬型のもは普通4チャンネルから8チャンネル程度である。しかし、比較的楽に運搬できるものとなると、

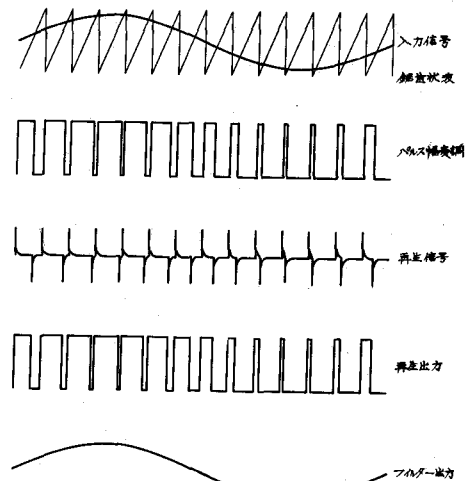


図-13 PWM変復調変換過程

^{*} このテープ速度の変動をワウ(wow) フラッター(flutter)と呼び、周波数成分の低い変動(5～6%以下)ワウ、周波数の高いものをフラッターと呼ぶ。テープ速度が一方向に変化するのはワウとは呼ばないで、ドリフト(drift)と呼ぶ。

現在のところ4チャンネル程度のものである。チャンネル数は多いほど良いというものではなく、チャンネル数の増大につれて重量は増大するし、記録しない磁気テープのトラックもレコーダーにかけたり、はずしたりしている間に電磁的に、あるいは機械的に損傷されるおそれもあるので、必要最少限のものを選んだ方がよい。後述するデーター処理との関連を考慮すると、テープ速度を記録時と再生時とで変えて時間軸 (time base) 変換を行なった方が便利な場合があるので、テープ速度が広範囲に変えられるものが便利な場合がある。例えば海の波のような非常にゆるやかな変動 ($1\text{ }^\circ/\text{s}$ 以下) を記録するには、非常におそいテープ速度で記録して、処理法に応じて $100 \sim 1,000$ 倍程度に増速して再生すれば、非常に短時間で処理することができる。

(6) 記録器の選定

各種の記録器を選定する際には、次のような事項が基本的な条件となる。

- (i) データーの量とその処理法
- (ii) 記録の精度
- (iii) 記録する信号の周波数帯域
- (iv) 同時記録の必要なデーターの数
- (v) 使用条件 (使用する自然環境、電源など)

データーの量が非常に多く、人力で処理しては間に合わないような場合には、自動処理の必要性が生じるので、後述するデーター処理装置にかけやすいような形で記録することが望ましい。このためには on-line でデーター集録装置に信号を送りこむことが精度の点では最もすぐれているが、かなり高価につくし、必ずしも便利でない場合も多いのでデーターレコーダーが多く使用される。また、後述する紙テープにパンチする形式のデジタルレコーダーを使用することもできる。非常に高い精度でアナログ記録を行なうには、変動周波数がおそい場合には自動平衡型の記録器がすぐれているし、データーレコーダーを使用する際には、予算的な余裕があればデジタル方式も考えられる。

記録する信号の周波数帯域も重要な要素で記録紙に記録する際には、おそい方から順次並べると、自動平衡型記録計 ($1\text{ }^\circ/\text{s}$ 以下)、ペンオッシログラフ ($0 \sim 100\text{ }^\circ/\text{s}$)、電磁オッシログラフ ($0 \sim 5,000\text{ }^\circ/\text{s}$) となる。これ以上の高い周波数の信号は、連続的なものであればデーターレコーダーの使用、単発的なものであればシンクロスコープの像を写真撮影という方法が考えられる。

以上のようにして、記録器のタイプが一応定まると同時に記録する量の種類に応じてチャンネル数が定まってくる。ただし、ここで注意しなければならないのは、非常に周波数領域の異なった量 (例えば風波と潮位) を同一の記録器に記録するのは得策でない点である。周波数の高い量を記録するには、それに見合った速い速度で記録紙を送らなければならないが、一般に記録をあまり長時間連続して行なう必要も少ない。これに反して、非常に周波数の低い量を記録するには非常に長時間記録をとる必要があるが、記録紙 (あるいはテープ) の速度はおそくともよい。したがってこのような場合には別々に記録した方が便利である。*次ページ
特に現地計測においては、たとえ一番適切なレコーダーが上記のようにして定まったとしても、使用電源の

問題、環境の悪さ（振動、高湿度、高温度あるいは低温、潮風など）などで複雑な構造の記録器には適しない場合も実際問題として生じる。もちろん、十分な経済的な余裕があれば、これらの大部分は克服できる。

3-4 デジタル型計測器

(1) アナログ計測とデジタル計測

自然現象における諸量の変化は、巨視的な意味では大部分連続的である。この連続的に変化する被測定量を、一定の比例関係を保ちながら変換し、連続的な量として指示あるいは記録するのが一種のアナログ計測を考えることができる。しかしながら、この場合にも最終的に数値として読みとる段階では状況に応じて定まる最小単位で切り捨てて量子化せざるを得ないし、また1-2で述べたように測定は本来被測定量を量子化することを必然的に含んでいる。静的な量の測定の場合についてももちろん同様なことがいえる。したがって、我々が一般にアナログ計測と考えているものは、被測定量を連続量として次々と変換してきて最終的な段階で人間が量子化するかわちデジタル化を行なう測定法と考えることができる。

これに反してデジタル計測では、被測定量を最初から変換の初期の段階で、あるいは変換の最終段階か、表示、記録の段階で、いずれにせよ人間が読みとる以前に量子化して表示あるいは記録する方法と做すことができる。また、この時間的に変化するアナログ量をデジタル化、すなわち、A-D変換する過程では必然的にサンプリング操作、すなわち、時間的にとびとびの値で数値化する操作が入ってくる。このため、入力信号の周波数成分の上限が、このサンプリング間隔でおさえられ、サンプリング周波数の半分の周波数（Nyquist frequency or folding frequency）以上の情報量は失われてしまう。

ところで、最近、大はデジタル計算機より、デジタルレコーダー、デジタル電圧計、エレクトロニクカウンタなど様々なデジタル型の装置が非常に多く使用されるようになってきている。その背景の一つには次のようなデジタル化による大きな利点があげられる。

- (i) 数値化が自動的に行なわれるので読みとりの個人差など人間がひきおこす誤差が介入しない。
- (ii) 一度デジタル化してしまえば精度が損なわれにくい。特に信号の伝送や変換の段階でこのことは利点である。
- (iii) 桁数を増すことによって精度を非常に高めることができる。
- (iv) データーを高速で変換し、数値化して保存することが可能である。
- (v) 電子計算機を使用してデーターを高速で処理することができる。

しかしながら、この方法が万能かという点必ずしもそうではなく次のような欠点も含んでいる。

(i) 結果を感覚的に判断しにくい。特に変化の傾向や数種の量の相関関係などを短時間で理解することが困難である。

(ii) 1度サンプリングしてしまうと、サンプリング周波数で定まる情報内容の周波数の限界（Nyquist

＊）適当にサンプリングして同一記録器に記録する方法も考えられるが、相方とも微細構造まで調べようとすると、何かと不便が生じる。

frequency) が定まり、それ以上の高い周波数の情報が必要となっても記録よりとりだすことができない。

(iii) 場合によるとアナログ演算回路で処理したほうが、はるかに簡単で高速な場合がある。

(iv) 現在の時点ではデジタル型の計測器の多くは高価である。

したがって、実際の計測システムをつくりあげる際には、必要な情報量およびその精度、変換器でおさえられる精度の限界、データ量およびその処理法、それに予算など様々な要素を考慮して方式をまとめる必要がある。

次に比較的多く使用されるデジタル型計測器の2～3について述べる。

(2) カウンター

デジタル型計測器の中で最も一般的に使用されているのがカウンター electronic counter で、主として周波数、周期、時間間隔などの測定に使用されるが、適当なA-D変換器を附属させることによって各種の物理量の測定に使用することもできる。

カウンターの機能は大別すると、(i)ある定まった時間内に発生する未知のパルス数を計数する機能と、(ii)未知の時間内に発生する既知の周波数のパルスを計数して逆に未知の時間を知る機能とに分けられ、前者は周波数の測定が属し後者に周期、時間などの測定が属する。

図-14 a. b. cはそれぞれ、カウンターによる (a) 周波数の測定回路、(b) 周期の測定回路、(c) 時間間隔の測定回路をそれぞれ示す説明図で、これより測定の原理を容易に理解することができる。すなわち、(a) 周波数の測定についてみると、水晶発振器よりの正確な周波数(普通 10^{-6} の精度、高精度のもので 10^{-9} 程度の精度)を分周したもので正確な定まった時間(例えば1.00000秒)だけゲートを開き、外部の信号を整形してパルス化したものを通して計数回路でその数を計数すれば外部信号の周波数(1秒間の平均周波数)が測定される。

カウンターで直接計数して測定できる周波数の上限は普通10 MC程度であるが、入力信号の周波数を変換して減することによって更に高いものも測定できる。

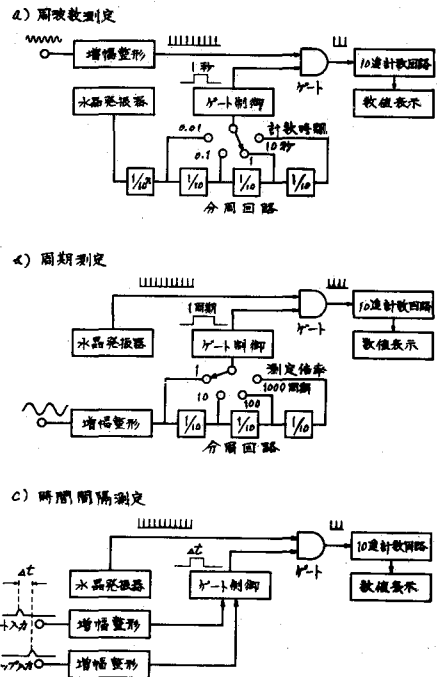


図-14 カウンター動作原理

(3) デジタル電圧計

デジタル電圧計 digital voltmeter は、A-D変換器A-D converter を内蔵して被測定電圧をA-D変換し、数値として表示できるようにした測定器で、高い精度で簡単に電圧を測定することができる。またこれに電圧抵抗変換器を組込んだものにデジタル抵抗計もある。

デジタル電圧計は、内臓するA-D変換器の型式により、
(a)計数方式のものと、(b)比較方式のものとに大別される。

計数方式のものは、図-15aに示すように入力のアナログの電圧を内臓の正確なのこぎり波の電圧③と比較することによって、時間巾(①と④のパルスの間隔)に変換しこの時間巾だけゲートを開き、正確な周波数のパルス(クロックパルス⑤)を通過させてやり、それをカウンタで計数することにより数値として電圧が示される。この方式の精度は、主として、のこぎり波の直線性、比較回路の立ち上りで決定し、普通0.1%程度の精度である。この方式は(i)原理的に構成、組みあげが簡単である(ii)論理回路をほとんど含まない(iii)比較的高速の変換ができるなどの利点があるが、のこぎり波の直線性、レベルの変動などが精度をおさえる。このほか、計数方式のなかには、のこぎり波の代りに階段波形を使用したものや、電圧一周波数変換器を使用したものもある。

比較方式のものには、いろいろな方式のものがあるが、原理的な動作は、図-15bに示すようなものである。

数値設定回路に適当な数値を設定しておき、それに比例した電圧をD-A変換器でアナログ電圧に直し、比較回路で、入力のアナログ電圧と比較する。比較の大小に応じて、数値設定回路に"down"、"up"の信号を送る。数値設定回路の数値はdown, upの信号に応じて数値が変わり、そのたびに新しい比較を繰返す。この操作を何回か繰返して、入力電圧とD-A変換器の出力電圧とが比較回路の分解能の範囲内で一致したとき、そのときの数値設定回路の設定数値をもって入力電圧のデジタル量とする。^{*}この操作は、化学天秤で分銅を加減して重さの測定を行なう操作に極めて似ている。

高精度のものは一般にこの方式のものが多く、0.01%程度の精度のものもある。また変換速度ならびにサンプリングの速いものは50 μ s程度のものがあり、後述するデータ集録装置などにも使用されている。また、積分型デジタル電圧計と呼ばれるものが最近多く使用されるが、これは入力電圧をきわめて直線性のよい積分器でいったん積分し、その結果をパルスに変換して測定するもので、この積分時間を商用周波数の周期に比例した時間にとれば、入力に混入した商用周波数雑音(50%又は60%およびその高調波)が平均化され雑音成分は零となる。このようにして誘導雑音に非常に影響され難くしたものが積分型デジタル電圧計である。

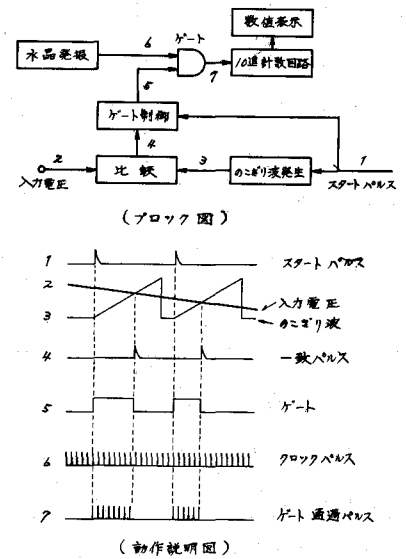
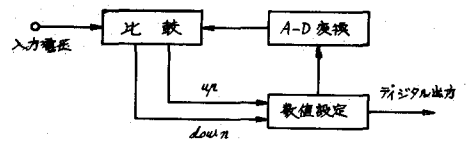


図-15a 形数方式A-D変換器

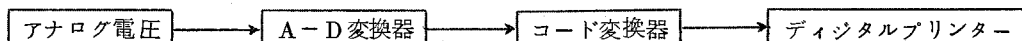


^{*}最も多く使用されている方式は、最高桁数より順次比較してゆくやり方である。

(4) デジタルレコーダー digital recorder

測定量をペン書オシログラフ等でアナログ量として記録する換りに、前述のカウンターやA-D変換器などでデジタル化して (i) 数字として印刷したり (ii) 特殊なコードで紙テープにさん孔したり、磁気テープに記録したりする方法がある。電動タイプライターや高速ラインプリンターなどが(i)に属し、高速度紙テープさん孔機やデジタル型磁気テープレコーダーなどが(ii)に属し、特に後者は、データの高速自動処理に適しているため最近非常に多く使用される傾向にある。

印字は普通の数字ならびに特定の記号を含んで行なわれ、印字速度は普通のデジタルプリンターで1行に4～18桁の数値を1秒間に1行程度、高速ラインプリンターを使用したもので14桁の数値を1秒間に4行程度である。これらのデジタルプリンターの入力は、多くの場合、後述するBCDコード(1-2-4-8あるいは1-2-2-4)であるので、アナログ電圧を記録するには次のような過程による。^{*}



B.C.D すなわち Binary Coded Decimal は2進符号化10進法あるいは2進化10進法とも呼ばれるもので、10進法の各桁を単独に2進法で表わすもので、10進法の数ならびに純2進法と比較すると表-2のようになる。この表から容易にわかるように、2進法は最も少ないビット bit で数値

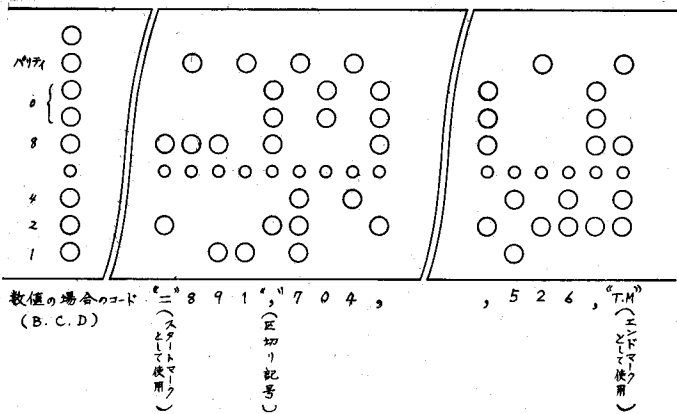
表-2 各種数値コード

10進	純2進	2進化10進	10進	純2進	2進化10進
	$2^4 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0$ 16. 8. 4. 2. 1.	$2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0$ 8. 4. 2. 1. 8. 4. 2. 1.		$2^4 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0$ 16. 8. 4. 2. 1.	$2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0$ 8. 4. 2. 1. 8. 4. 2. 1.
0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	16	1 0 0 0 0	0 0 0 1 0 1 1 0
1	0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 1	17	1 0 0 0 1	0 0 0 1 0 1 1 1
2	0 0 0 1 0	0 0 0 0 0 0 1 0	18	1 0 0 1 0	0 0 0 1 1 0 0 0
3	0 0 0 1 1	0 0 0 0 0 0 1 1	19	1 0 0 1 1	0 0 0 1 1 0 0 1
4	0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 1 0 0	20	1 0 1 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0
5	0 0 1 0 1	0 0 0 0 0 1 0 1	21	1 0 1 0 1	0 0 1 0 0 0 0 1
6	0 0 1 1 0	0 0 0 0 0 1 1 0	22	1 0 1 1 0	0 0 1 0 0 0 1 0
7	0 0 1 1 1	0 0 0 0 0 1 1 1	23	1 0 1 1 1	0 0 1 0 0 0 1 1
8	0 1 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0	24	1 1 0 0 0	0 0 1 0 0 1 0 0
9	0 1 0 0 1	0 0 0 0 1 0 0 1	25	1 1 0 0 1	0 0 1 0 0 1 0 1
10	0 1 0 1 0	0 0 0 1 0 0 0 0	26	1 1 0 1 0	0 0 1 0 0 1 1 0
11	0 1 0 1 1	0 0 0 1 0 0 0 1	27	1 1 0 1 1	0 0 1 0 0 1 1 1
12	0 1 1 0 0	0 0 0 1 0 0 1 0	28	1 1 1 0 0	0 0 1 0 1 0 0 0
13	0 1 1 0 1	0 0 0 1 0 0 1 1	29	1 1 1 0 1	0 0 1 0 1 0 0 1
14	0 1 1 1 0	0 0 0 1 0 1 0 0	30	1 1 1 1 0	0 0 1 1 0 0 0 0
15	0 1 1 1 1	0 0 0 1 0 1 0 1	31	1 1 1 1 1	0 0 1 1 0 0 0 1

*) デジタル電圧計の多くはこのコード変換器を内蔵しB.C.Dの出力がとり出せるようになっている。

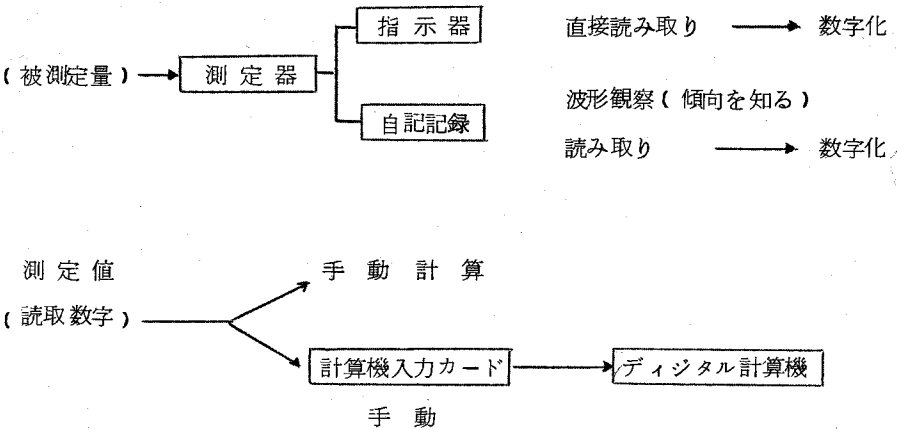
を表わすことができ、計算回路には最も適しているが、我々が普通使用しているのは10進法であるので、表示の段階では2進法は直観的にはわかりにくい。このため、多少の無駄をゆるして、2要素(1と0あるいはONとOFF)を用いて10進数を表わすようにしたものが各種考えられ符号化10進法と呼ばれている。2進法10進法はその1つで($2^3, 2^2, 2^1, 2^0$)で10進法の1桁を表わすようにしたものである。

紙テープさん孔機の場合にもこのBCDが多く使用され、図-16はその1例を示したものである。高速度テープさん孔機の場合は普通25字(character)*1/秒、非常に高速のもので300字/秒程度である。



3-5 データ処理装置

従来の観測データの処理は大略次のような過程で行われていた。



例えば、時間的変動量を自記記録して観察することは現象の概要の全体的把握、相互関係の直観的判断などには非常に役立つけれども、実際に定量的に現象を解明するためには、理論的な解析、それに付随する数値的な処理(計算)が必要となる。上記の方式では、この数値計算を人力で行なうか、計算機を使用するとしても入力データの作成を人力で行なわなければならない。

最近、複雑な変動現象の解析法の進歩とともに、極めて大量のデータを処理する必要性が増大してきて、

*1) 字 character は桁 digit と云ってもよいが、コードが数字のみでなく文字を意味する場合もあるので字と呼ぶ方が適切である。図-16の紙テープで言えばさん孔の1列が1字に相当する。

次第に人力では処理することが困難になってきている。一方では、各種の系の精密な制御を電子計算機を使用してディジタル方式で行なう傾向も非常に強くなってきている。

このようなことを背景として、電子計算機を用いてデータの演算処理を行なうことを前提としたデータの処理システム data handling (acquisition) system が次第に多く用いられるようになってきた。次に述べる高速データ集録装置は、このようなシステムの主要部の一つで、入力のアナログデータを高速で処理して電子計算機にかかるような形に変換し、計算機に on line あるいは off line で送り込むための装置である。

(1) 高速データ集録装置

高速データ集録装置 high speed data acquisition system の主要な構成は、図-17 に示すようなもので各種の入力源から来るアナログ信号（電圧）を高速で処理して最終的には電子計算機に送り込むために使用される。

入力源としては ①各種の測定器より直

接来るもの ②アナログ型データレコーダーを介して来るもの ③カーブトレーサー（後述）を介して来るものなど、場合に応じて色々あるが、いずれにしてもアナログ電圧として与えられなければならない。

入力電圧が A-D 変換器の入力として不足のときは、プリアンプにより増巾し、多数の測定量の同時値が必要な場合にはサンプルホルダー sampling holder で同一時刻にすべての測定量をサンプルして一定時間ホールドしておき、走査器 scanner（あるいは multiplexer）で次々に切換えて各チャンネルの信号を A-D 変換器に接続し、* A-D 変換器でディジタル量に変換された後、色々なルートで電子計算機に送り込まれる。

図中 ② の方式は A-D 変換された信号を適当な符号処理を行なった後、一度ディジタル磁気テープに記録し、これをさん孔スピードにあわせて低速で再生し、さん孔機で計算機にかかるような形式の紙テープを作成するもので、従来一番多く使用されていた方式である。しかしながら類似したデータが非常に多くなると、この方式では、紙テープのさん孔に要する時間ならびにさん孔テープを計算機に読み込ませるに要する時間、特に後者が問題になってくる。

①-② の方式はこの欠点を克服するために最初から、そのまま計算機で処理できるようなフォーマットで磁気テープに記録する方式で、磁気テープ (M.T) までは on line で作成することができる。

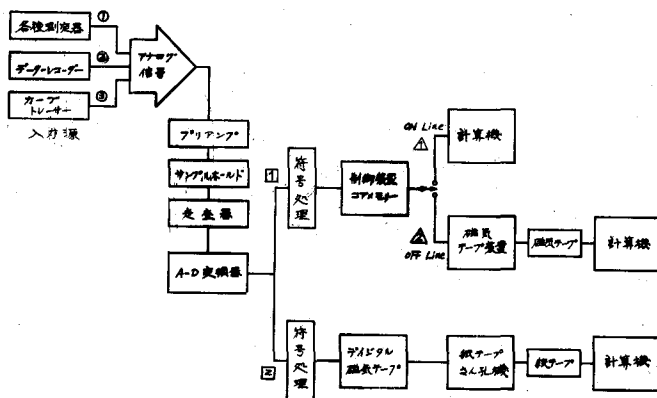


図-17 高速データ集録装置

*）したがって、サンプルホルダーまでは並列であった多数の測定値は、走査器の段階で直列に配列し直される。勿論、A-D変換器を多数使用すれば並列でも処理できるが、不経済である。

すなわち、A-D変換器の出力は、適当に符号変換された後、コアメモリに入り、ここで配列を調整して計算機にかかるようなフォーマットで送り出され磁気テープに記録される。この磁気テープはそのまま計算機にかけることができる。

①-①の方式は完全に on line で処理する場合で、即刻データを計算機で処理してその結果を必要とするとき、特に演算処理結果で入力系の制御を自動的に行なう場合などに使用される方法である。

高速データ集録装置の性能

入力チャンネル数	入力電圧	サンプル数	A-D変換速度	総合精度
1~30(任意)	0~10V	比較的速いもので 10,000点/秒	比較的速いもので 40 μ sec	0.2%以内

以上述べた ①, ② のシステムはどちらかというと大型のシステムで、別表のような非常にすぐれた性能を有しているが、このほかに、簡略化された各種の方式がある。例えば、比較的小さい現象を計測する場合には、ほとんど同時と做せる程度で各チャンネル信号のサンプリングができるのでサンプルホルダーは不要であるし、テープさん孔機が追尾できる位の速さでサンプリングできるので、A-D変換器の出力をコード変換した後、直接さん孔機に送って紙テープを作成させることができる。

(2) カーブトレーサー curve tracer

現在の段階では、測定記録をまだ各種のオシログラフを使用して紙上に記録する場合がかなり多い。このような記録を処理して計算機にかかるような形(多くの場合さん孔テープ)に変換する装置をカーブトレーサー、オシログラムトレーサーあるいは記録読取器などの名前で呼び、各種の形式のものが使用されている。すなわち、記録紙上の曲線を光電素子で自動追尾し、自動的にアナログ電圧に変換した後、A-D変換して(1)と同様な過程を経て紙テープに自動的にさん孔あるいは印字するもの、曲線追跡は人間が行ない、紙テープのさん孔も人間の指令でパンチャーを作動させて行なうもの、この両者の中間のものなど各種のものが市販されている。

データの量がそれほど多くないと、この装置を使用して比較的容易にデータの処理が可能であるが、データ量が増すと、光電追跡素子は速度が極めておそいこと、人間が追跡すると非常に疲労することなどのため、この方式では次第に処理が困難となってくる。

参 考 図 書

参考文献ならびに各社の計測器に関する資料などは、あまり多岐にわたるので一切省略する。参考図書も、計測を特に専門としていない筆者にとって、それらが代表的と云えるかどうか不明であるが、手元にある今回直接に参考にしたもの、最近目を通したものなどをあげる。

A 測定ならびに測定器一般に関するもの

- 1) 磯部孝、蒲生秀也、測定の精度 岩波講座 現代物理学 IVA 岩波書店
- 2) 磯部孝 測定技術、同上講座 IVB 岩波書店

1) 2) とともに測定に関連した基本的事項について簡潔にまとめている。

B 気象ならびに海洋測器

- 3) 佐貫亦男、磯野謙治 気象器械 気象学講座第6巻 地文書館
- 4) 佐貫亦男、地上気象器械 共立全書 共立出版 KK
- 5) 日本海洋学会、海洋観測指針
- 6) 井島武士 港湾測量、測量実務叢書10 森北出版 KK
- 7) 運輸省港湾局 港湾技術要報/644
- 8) Roy D Gaul 編 Marine Science Instrumentation vol.1 1961
- 9) " Marine Science Instrumentation vol.2 1962

Plenum Press

3)~4)は気象器械について詳述、5)は海洋観測法、6)は海岸工学に関連した観測法についてそれぞれ具体的に書いてある。7)は港湾工事に關する調査観測試験機器特集号で、比較的新しいものも含め多方面にわたり解説してある。8)は海洋計測のシステム、9)は各種の測器に関する論文をそれぞれまとめたものである。

C 変換器に関するもの

- 10) Kupt S Lion 神山、三浦共訳 トランスジューサーとその応用 オーム社
- 11) 西村望 トランスジューサー 日刊工業新聞社
- 12) 西野治 工業電子計測 コロナ社
- 13) 工業計測技術大系 全12巻 日刊工業新聞社

これらの図書は書名よりもわかるように、工業計測における各種の変換器を詳述したものであるが、変換器ならびに変換法は一般性のあるものであるので、非常に参考になる。13)は温度、流量、変位、厚さの測定など測定量別に一冊ないし二冊にまとめて非常に詳しく記述しており、単に変換器に限らず測定法、測定系全般にわたる記述が行なわれている。

D エレクトロニクスに関するもの

- 14) 霜田光一、エレクトロニクスの基礎、物理学選書、裳華房
- 15) Malmstadt, Enke, and Toren. Electronics for scientist 1963 Benjamin
- 16) エレクトロニクス講座、基礎編全6巻 応用編全6巻 共立出版 KK

- 17) 解説エレクトロニクスコース、全 8 巻 共立出版 KK
- 18) 立花太郎、古賀正三編、電気技術ハンドブック 化学同人 KK
- 19) 電子回路ハンドブック 丸善

14)、15)はエレクトロニクスに関する基本的な事項を電気工学者以外の人にもわかり易く記述した、やや専門的な本、16)はそれぞれの専門家を動員して執筆された体系的な図書で専門外の人にも理解し易いように配慮されている。17)は専門外の人でエレクトロニクスを利用する人のために書かれた解説書で比較的新しいものまでとり入れられている。18)は発行が約10年まえであるため少し古いけれど初心者にとって非常に役に立つことが記述されている。

E デジタル計測器およびデーター処理

- 20) 前出 13) 第12巻、信号変換とデーター処理
- 21) 前出 16) 応用編4、データー処理装置とその応用
- 22) 前出 17) 6巻、観測からデーター処理まで
- 23) 前出 19)
- 24) A-D変換器とその応用、日刊工業技術選書 36 日刊工業新聞社
- 25) 喜安善市編 入出力装置、情報科学講座 D 13, 1 共立出版 KK

20)、23)には比較的詳しい説明が行なわれている。概略的な説明は 22)、21)、24)などにみられる。25)は情報処理装置としてのデジタル計算機の入出力装置に関しまとまった記述が行なわれている。

F 実験および観測に際しての心構えを記述したもの

- 26) 中村清二 物理実験者の心得、物理実験学 第一巻 河出書房
- 27) 岡田武松 気象観測心得、物理実験学 第11巻 河出書房

いずれも古典とも云える本であるが、自然現象を観測するに際しての基本的な心構えが具体的に記述されている。