

最近の工業調節計

大阪大学基礎工学部 白江 公輔

1. はしがき

工業プロセスにおける自動制御は、1930年代より工業の各分野にひろがり、わが国においては、戦後急速に発展をみた。

旧来の可動コイル型計器にかわって登場した電子管X式自動平衡計器は、広いX適用範囲、優れた精度、強力な駆動力を有し、空気圧式自動制御装置を広く普及させる一因となった。その後幾多の改良が加えられ、現在も小型空気圧制御装置シリーズとして活躍している。

一方電子式制御装置は、すでに1940年にドイツにおいて開発されており、その後石油精製やボイラー関係にかなり用いられていた。アメリカにおいては1950年代のはじめに、数社が電子式制御装置を開発し、従来の空気圧式制御装置に満足でなかった石油工業や化学工業に採用されることとなった。その後計器大手メーカーが1958年のI. S. A. の展示会にそれぞれの電子式制御装置を発表し、空気圧式制御装置との競争が始まった。わが国では試作品は1958年頃より展示会のトピックスにはなったが、実用の段階に入ったのは1960年以降のことである。

電子式制御装置は空気圧式のそれに比し次のような特徴をもっている。即ち 1) 伝送おくれのないこと、2) 演算が容易、3) ゲインが高くとれる、4) 計算機との結合が容易、5) 可動部をほとんどもたないこと、などである。しかし他方防爆構造、誘導障害等空気圧式にない問題点があり、価格上必ずしも安価ではない。

以上極く簡単にプロセス用自動制御装置の発展のあとをふり返ってみたわけであるが、電子式制御装置の歴史は末だ極めて若いといえる。ここでは電子式制御装置について調節計を中心に説明することにする。それでまず電子式制御装置の概要について説明し、空気圧式制御装置での電子管自動平衡計器の果たした機能の大部分をうけもつ変換器にふれ、次いで本題の調節計に進むことにする。

2. 電子式制御装置の構成

電子式制御装置においては、プロセス変数（温度、流量、圧力……）は検出器および変換器を介して電気信号

に変換される。電気信号としてはその最小、最大の比が1:5であるような直流電流を採る場合が多い。（例えば4~20 mA DC）この信号が調節計に送られ、ここで比例、微分、積分等の演算が行われ、その出力（矢張り同種の電気信号）が操作部を駆動する。この程度の電流では大きな力を発生することは出来ないで、ここで電気-油圧、電気-空気圧等のパワー増巾が行われて弁を駆動する。一方変換されたプロセス変数は調節計に入ると共に、指示計、記録計、データロガー等に入るとも入るが、これら表示計器は off-line で用いられているのが一つの特長となっている。以上を図示すると図1の如くなる。

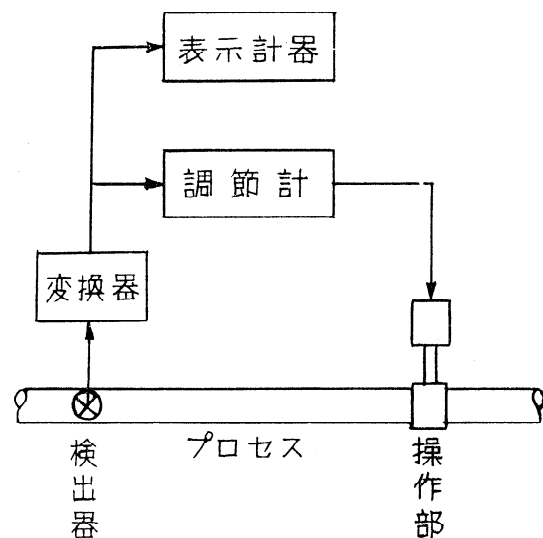


図 1

電気信号として DCmA が多く採用されている理由は小型真空管、あるいはトランジスタで容易に扱える大きさであること、低い入力抵抗の受信が出来ること（可動コイル計器等）、長距離伝送に際して電圧信号より誤差の発生が少く、誘導障害に強いこと、DCであるため演算が容易なこと等である。Livezero がとられた理由は、0からの信号を出すには回路構成が複雑になること、0点の点検の容易なこと、変換器の2線方式が可能なこと等があげられる。

3. 変換器

温度、圧力、PH等のプロセス変数は何らかの手段で取り扱い易い量に変換されなければならない。熱電対により温度はDCmVに、圧力はストレンゲージにより抵抗変化に変換され、差動トランスを用いれば変位はACVになる。このように種々の性質のプロセス変数をとにかくも、取り扱い容易な量に変換する部分を検出器或は一次変換器という。しかし検出器の出力信号も上述の例の如く、DCmV、ACV、R……と多種にわたりそれぞれに専用の調節計を準備するのは、製造者にとっても使用者にとっても不便である。電子管式自動平衡計器はこれらの量をすべて、すべり抵抗上の摺動子の位置という機械量に統一することが出来た。このため共通の空気圧式調節計が可能になった。電子式制御装置では空気圧式で電子管式自動平衡計器が果たした役割のうち、信号の増幅という機能を変換器が行う。従って記録計は制御の目的からは不用で、結果の監視を行う目的で閉ループ外に設けられる。このように変換器の役割は重要である。変換器は検出器の近傍または一体になって設置される場合が多く、悪条件で安定な動作が要求される。

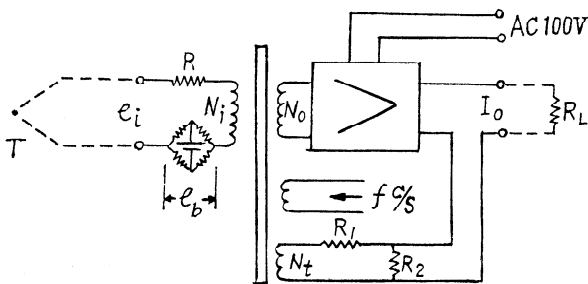


図 2

次に一、二の変換器の例をあげてその機能を説明する。図2は熱電対の発生起電力をDCmAに変換する温度変換器と呼ばれるものである。この例では磁気変調式直流増巾器によってDCmVをDCmAに変換している。入力電圧 e^i はバイアス電圧 e^b と加算され、これに比例した直流微小電流が磁気変調器入力巻線 N_1 に流れる。磁気変調器は $f\%$ の交流電圧で励磁され、出力巻線 N_o からは直流アンペアターンに比例した $2f\%$ の交流電圧が発生する。これを増巾後、復調して直流電流 I_o を得る。 I_o は R_1 、 R_2 で分流され帰還巻線 N_f に負帰還され、全直流アンペアターンが0になるように動作する。従って増巾器のゲインが充分高いと

$$I_o = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{R_2}{R \cdot (R_1 + R_2)} \cdot (e^i + e^b)$$

が成立する。従って任意の変化範囲を有する e^i に対し、 e^b および R 、 R_1 、 R_2 を適当な値にすることによって I_o

の変化範囲を常に一定にすることが出来る。上の式にはアンプゲインおよび負荷抵抗の項があらわれず、出力は周囲条件の変化に鈍感であり、かつ出力は定電流特性を有する。

図3はダイヤフラム型差圧変換器の一例である。これは受圧室の圧力 P_1 、 P_2 の差をこれに比例した直流電流に変換するために用いられる。受圧室内のダイヤフラムの加わる左向き力はトルクモーター(M)による力と常に平衡を保っている。平衡状態からのずれは、微小変位検出装置Sによって検出され、これを増巾してトルクモーターの電流を変化させ、再び平衡状態にする。従ってトルクモーターの電流、すなわち出力電流 I_o は差圧 $P_1 - P_2$ に比例する。レンジ及び0点はレバーの支点CおよびO調整ねじZによって変えうるから、差圧の変化範囲に無関係に出力の変化範囲を一定に保つことが出来る。

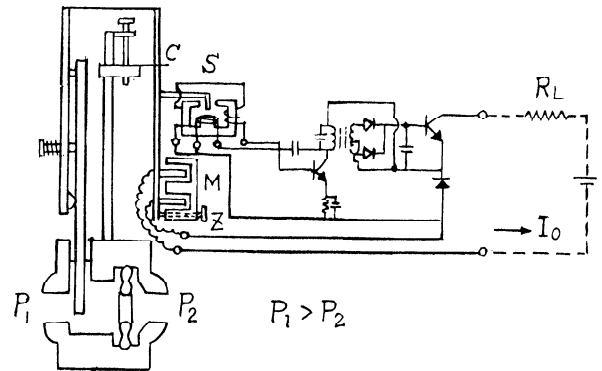


図 3

この場合は図よりわかる如く変換器の供給パワーと出力電流は1組の配線を兼用している。2線式ともいわれる。以上はプロセス変数の代表的な温度圧力流量等の変換器の一例に過ぎない。他にPH、濃度、湿度等もそれぞれの検出器の特性に応じて特長ある変換器が作られている。

4. 調節計

変換器によって電気信号に変換されたプロセス変数は次いで調節計に入る。調節計は目標値と入力信号を比較

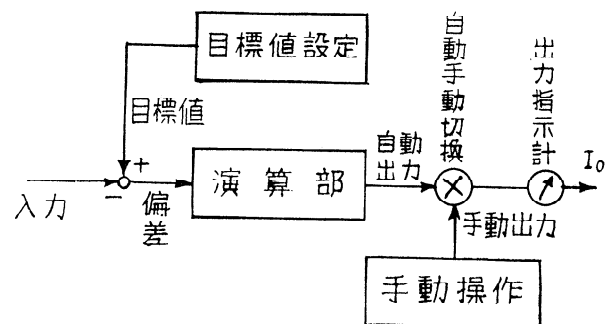


図 4

生産と技術

する部分、両者の差（偏差）に対して適当な演算を行う部分よりなり、演算の結果はやはり電気信号（DCmA）として送り出される。これが調節計の主要部であるが更に起動時や点検時に用いられる手動操作部分をもってい

であり、他の形式のものに比し融通性に富んでいる。しかし(c)以外のものでは制御状態を直観的につかむには便利である。プラントの規模が余り大きくない場合には記

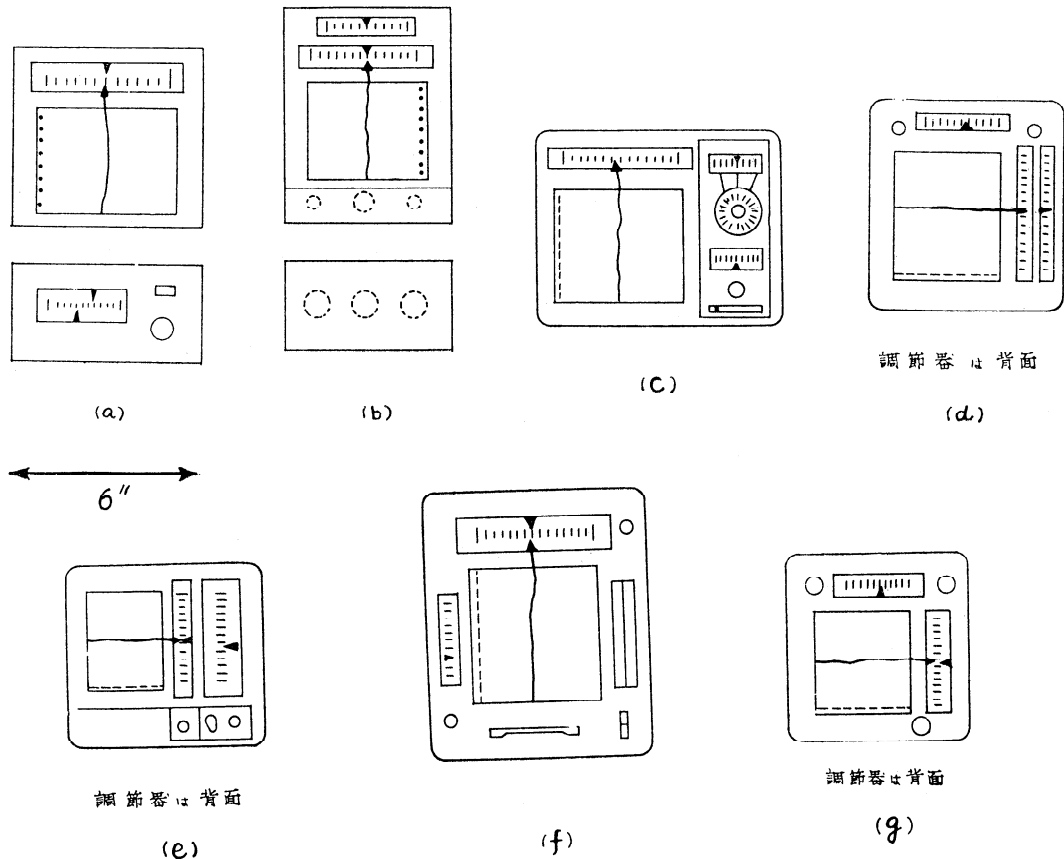


図 5

る。従って一般的な調節計は、図 4 の如き構成要素から成立するが、記録計との関連において種々の組み合わせが可能であり、いろいろな形式のものが製作されている。

図 5 は前面よりみた調節計の概略図であり、数年前に製品化された。これらはほぼ同一尺度で画かれている。同図(a)において上は記録計であり、下にハーフサイズの調節計が設置される。目標値は記録計側で設定され、目盛板上に指示される。調節計には自動、手動出力の指示計と、切換スイッチ、手動出力を調整するつまみがある記録計を取り除く場合は目標値設定器を別に用意しなければならない。(b)では目標値設定および調節計出力共に記録計上に示され、切換スイッチ等も記録計内にあるため、調節計は別ケースであるが一体とみなさねばならない。(d)・(e)は記録計内に調節計部分を収容してあり両者の分離は出来ず、記録調節計と呼ばれるものである。

(c)は右の 1/3 の部分が調節計であり、中央に目標値設定用ダイヤル、上部に偏差指示計下部に出力指示計を有する。従ってこの部分だけを独立して使用することも可能

録計と調節計を組み合わせたものの使用は便利な点が多いが、大規模なプラントになり、自動制御の点数が増加すると、パネルスペースの点からみて、調節計の占めるパネルサイズは小さいことが要求される。また記録は多点記録計或はロガーで処理してしまえばよく、調節計の示機能としては設定点からのへだたりが把握出来ればよいというような考え方も成り立つ。

1962年に米国において、それまで工業計器にほとんど関係のなかったM社が電子式制御装置を発表した。このシステムは従来の電子式の特長及び欠点を種々の面より検討して構成されており、いろいろ興味深い点があるが、2, 3の特長をあげると、変換器は2線式伝導方式であり、現場と計器室内は誘導障害に強い電流伝導であるが、計器室に入るとこれを定抵抗に流してD.C.Vに変換し以後の調節記録にはこの信号を並列に供給している。従来の方式では複数の計器の接続は直列であったが、この方式によると、一線接地により、実質の配線は一本でよいことになる。また記録計、調節計の電線はV

C100V の代りに直流 24V を使用し、常時 sand b7 電源を用意しており停電時には自動的に切換が行われる。なお現場の変換器と計器室内に信号線を利用して電話通絡が出来るとい装置までついている。この制御装置の調節計は記録調節計の構成をもっている点では従来のものと同じであるが、パネルサイズが図 6 (a)に示すが如く極

管は逐次姿を消していくであろう。I, D動作の演算用コンデンサーも漏洩電流の極めて小さいタンタルコンデンサの当達によって極めて小さいスペースで大容量のものが作られ、計器の小型化を促進している。調節回路はコンデンサーと抵抗よりなる演算回路と直流増幅器から

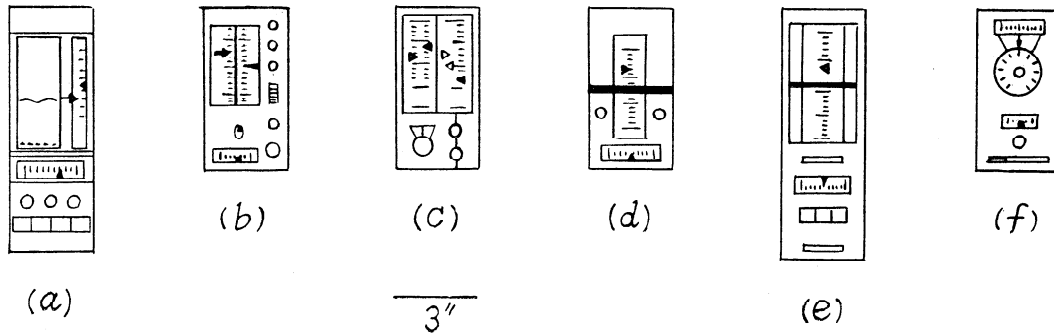


図 6

めて小さく出来ている。そのため限られたパネルスペースに多数の計器を設置することが可能となる。図に示す部 1/3 が調節計部分である。偏差の正負に応じてスケール面上には赤線のランプの表示が出る。

如く上部 2/3 が記録部分で設定点は、ここに示される下

図 6 (b), (c), (d), (e)は最近国内外の各社から発表された設定付調節計でパネルサイズは図示の如く大部分のものが 6"×3"である。(f)には図 5 (c)の調節計のみを示した。いずれも前面の配置は大同小異であって、共通的にいえる点は次の如きものである。設定点は、初期の記録調節計が固定スケール上で設定指標が移動したのに対し、設定点は中央に固定され、ドラム状のスケールが移動して設定値を示す、同一スケール上に偏差指示計があり、偏差を指示すると共に、設定用スケール上で読めば人力指示計ともなる。同種調節計を多数並べて設置する) 設定点は常に中心に来るから、全体の制御状態の傾向を直観的に把握するのに便利であろう。計器前面を有効に利用するため偏差指示計は偏差量の指示の他に、自動手動切換時のバンプレス条件の検査用、或はカスケードとローカルの切換時のバランス検出用等にも兼用されるものもある。これらの調節計は更に外部からの設定信号に対しても動作することが出来る。この場合は設定値は直読出来ないのが一般であるが、(e)の例では設定目盛板が外部設定信号に自動追従出来る装置を内蔵しており、表面で設定値が直読出来る構造になっている。

以上が調節計の外面よりみた機能の変化であるが、調節回路の点よりみると、ソリッドステート化が行われ、真空管は必要止むを得ない所にのみのこっている現状であるが、電界効果トランジスタ等の製品化につれて真空

構成されるが、直流増幅器の形式によって種々の調節回路が実用されている。次に代表的と思われるもの数種について説明しよう。

プロセス用調節計としては積分時間、微分時間は数種から数10分の値が要求されるから、C, R演算部のインピーダンスが高くなる。従って直流増巾器としては入力インピーダンスの高いものが要求される。このような見地からはアナログコンピューターの演算増巾器が考えられるが、プロセス用としてはアナコムにおける程周波数特性がのびる必要はなく(せいぜい10数%)一方信号レベルがアナコムに比し1~2桁小さい。また使用条件がアナコムに較べて極めて苛酷である。等の点で大いに異なる。

以上の点から、周囲温度の変化や、経時変化に基づくO点ドフトの少い変調形直流増巾器が専ら用いられている。

図 7 にバリキャップを用いた調節計の結線図を示す。D₁, D₂ が可変容量ダイオード(バリキャップ)でそのPN接合の呈するキャパシティが印加電圧によって変化することを利用して直流を交流に変換する。即ち D₁D₂ の容量及び固定コンデンサ C₁, C₂ で容量ブリッジを構成してある。D₁D₂ に直流電圧が印加されない時、このブリッジはバランスしていて、増巾器の入力は0である。ところが正の入力が入るとブリッジに不平衡が生じ、増巾器に入力加わり、これが増巾される。この出力が再びブリッジの励磁電圧として正帰還され発振が生じる。直流入力が大きさが増加すると、ブリッジの不平衡がより大になり、発振出力はほぼ直流電圧に比例して増加する。直流電圧の極性が逆になると負帰還になり、

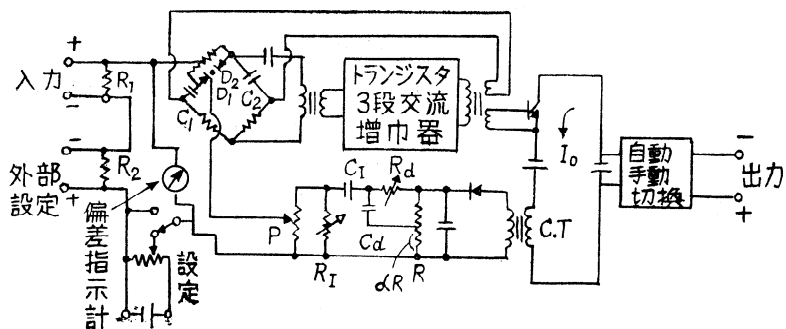


図 7

出力は 0 になる。この直流増巾器は 10~20 mV の入力
で最大出力が得られ、バリキャップとして Si ダイオ
ードを用いると入力抵抗を 100MΩ 以上にするこ
う出来る。次に全体の動作を考えると変換器からの電
流信号は固定抵抗 R₁ にて直流電圧に変換される。
・設定値は一定電圧を印加されたポテンシオメ
ーターから与えられ R₁ の電圧降下と比較され
これが偏差電圧となって調節回路の入力電圧とな
る。また増巾器の出力は出力トランジスターで B
級増巾され、半波整流波電流となるがこの直
流分は調節計の出力電流となり、交流分は電
流変成器 C.T を通った後整流され CR よりなる
P. I. D 演算回路に加えらる。この出力と偏差
信号の差がキャパシタンスブリッジの入
力直流電圧となる。従って調節回路にお
いて次の式が成立つ。

$$\{(E_s - R_1 I_0) - H \cdot K \cdot I_0\} A = I_0 \quad (2)$$

ここで H は P. I. D 演算回路の伝達関数、K は定数、
A は直流増巾器のゲインである。1/A ≪ H · K とすると

$$I_0 = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{H} \cdot (E_s - R_1 I_0) \quad (3)$$

となる、H を計算して前式に代入すると次式の通り P. I.

$$I_0 = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{1 + \alpha T^d S} \cdot \frac{\gamma}{P} \left[1 + \frac{T^d}{\gamma} \cdot S + \frac{1}{\gamma T^i} \cdot \frac{1}{S} \right] \cdot (E_s - I_0 \cdot R_1) \quad (4)$$

D の演算が行われていることがわかる。ここで比例率：
P、積分時間：Tⁱ = Cⁱ · Rⁱ、微分時間：T^d = R^d · C^d、相
互干渉係数：α = 1 + (1 + Cⁱ/C^d) · (T^d/Tⁱ) である。

(1 + αT^dS) なる項は調節計に入る比較的高い周波数成
分をもつ雑音を抑制するためのものである。(4)式よりみ
ると一定の偏差が存在する限り [] 内の第 3 項の積分
動作のため出力は一定速度で変化し続けるように見える
が、実際は $\frac{1}{A} \ll K \cdot H$ が満足されなくなると、調節計は、
A なるゲインをもった増巾器に他ならなくなってしまう。
従って A の大きいことが調節計にとって望ましい条件
の一つになる。出力電流 I₀ は、自動手動切換部を通

り自動の時はそのまま出力となるが、
手動の時は調節計内を流れたり、手動で
調節された電流が出力になる。操作部
へ与えられる電流が、自動から手動
またはその逆の切換に際して不連続に
変化するとプロセスに不要な擾乱を
与えるから、これを bumpless に切
換える必要がある。自動手動切換部は
この役目をする。外部信号電流によ
って

設定値を与えるには、R₂ での外部信号の電圧降下を用
いる。

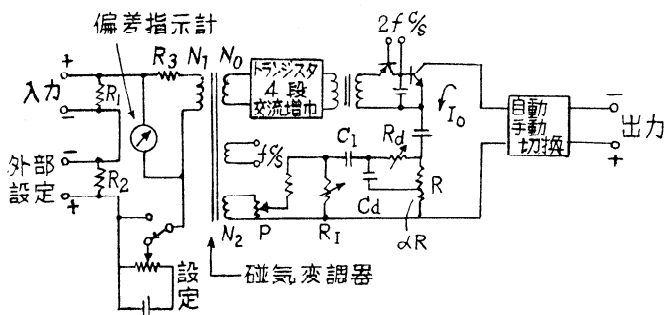


図 8

図 8 は直流増巾器として磁気変調式を用いる例である。
磁気変調器は元来その入力インピーダンスが低いので
特別の考慮がなされる。入力信号は矢張り電圧に変換
され、ポテンシオメーターから与えられる設定値と比
較され、偏差電圧は抵抗 R₃ を通して入力巻線 N₁ に加
わる。一方増巾器の出力電流 I₀ は、C、R よりなる
演算回路に加わる。演算回路の出力電圧は非常に高い
インピーダンスを有する故、これを固定高抵抗を通し
て負帰還用に多数回巻線された N₂ に加える。磁気
変調増巾器のゲインが充分高い時には前例と同様(4)
式が成立する。磁気変調式の特徴は巻線を追加する
ことにより、信号を相互に絶縁したままで多変数の
加減算を容易に行える点である。

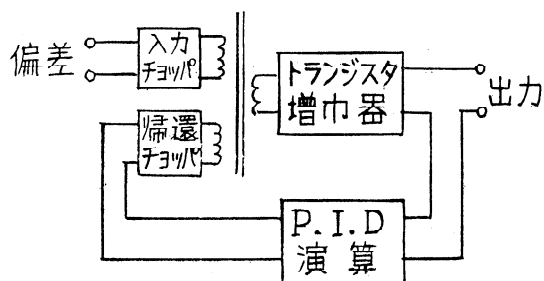


図 9

図 9 はトランジスタチョッパを用いた例である。偏差
は入力用トランジスタチョッパで交流に変換され、入
力トランスに加えらる。増巾器の出力電流 I₀ は、CR
からなる演算回路に加えられ、その出力は別の帰還用ト

ンジスタチョップにて交流電圧に変換され、入力トランスにて交流同士の比較を行っている。このため入出力間の絶縁が達せられるわけである。

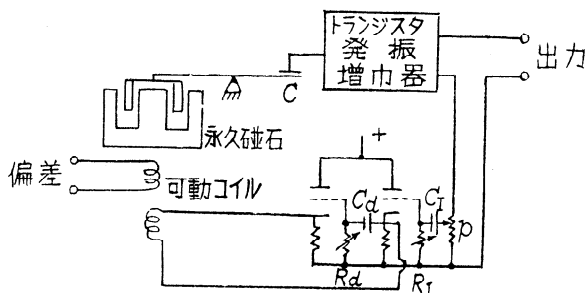


図 10

図10には以上のものとは変わった調節回路を示す。これはよく知られたマイクロセンバランス機構を電子回路とうまく組み合わせて装置の簡素化をはかっている。永久磁石の磁極間を動く可動コイルは2組のコイルよりなり、その一方に偏差信号が加わる。このためビームが変位しトランジスタよりなる発振回路のコンデンサーを変化させ、その結果発振出力が変化し、この出力を増巾整流された電流 I^0 も変化する。 I^0 は C、R と真空管よりなる回路において PID の演算を施されると共にインピーダンスを変換され、可動コイルの他のコイルに負帰還される。入力と出力の関係は (4) 式にて $\gamma = 1 + T/dT^i$ としたもので与えられる。

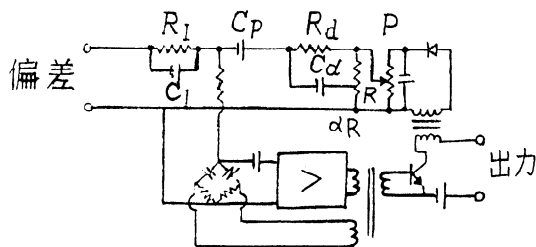


図 11

図11に示すものは、増巾器には図7と同様なバリキャップ式を用いているがPIDの演算の中、Iを入力部で行い、P、Dを帰還回路で行っている点が異なる。入出力の関係は(4)式にて $\gamma = 1 + T^d/T^i$ としたもので与えられる。

以上が回路上よりみた調節計の説明であるが、目標値の設定はいずれも調節計内で行うことができる上に、外部信号によって設定値を与える機構がいずれの場合にも組み込まれている。PID定数の設定は切換スイッチにより抵抗或はコンデンサを切り換えて行う方式であり、自動的に設定する機構のものは未だ見当たらない。しかし抵抗を光導電抵抗体でおきかえ、これに照射する光量を加

減することによりPID定数を設定する方式についての報告がある。このような光導電抵抗体とランプの組み合わせあるいは何らかの電圧(電流)によって可変な抵抗素子の利用により、外部信号によりPID定数を所要の値に設定出来る調節計がやがて発表されるかも知れない。

5. む す び

以上電子式制御装置の概観と、特に調節計に関して最近の傾向について説明したが、調節計に関しては、ソリッドステート化が進んだこと、従来の記録調節計の他にそのハーフサイズ位の小形設定付指示或は(偏差)調節計が出現した点等が新しい所である。

また最近話題に上っているものとして D. D. C 方式があり、あるいは最適値制御、適応制御に関する研究も甚だ盛んであり、計算機(広い意味での)のプロセス制御分野への応用はますます広がっていくものと考えられる。そして電子式制御装置の上述のような傾向もこれらで動きに対する一つの応答とみることも出来る。