

野口尚一監修
応用機械工学全書11

工業計測

川元修三著

野口尚一監修

応用機械工学全書11

工業計測

川元修三著

森北出版株式会社

著 者 略 歴

川元 修三

1922年 東京に生まる
 1947年 京都大学理学部宇宙物理学科卒
 1950年 東京大学工学部計測工学科大学院修了
 1950年～1967年 日本レギュレーター株式会社勤務
 1967年 工学院大学講師
 現 在 工学院大学教授
 専 攻 計測，自動制御

応用機械工学全書 11.
 工 業 計 測

© 川元修三 1972

1972 年 11 月 30 日 第1版第1刷発行
 1976 年 3 月 10 日 第1版第4刷発行

定価はカバー・ケース
 に表示してあります。

著者との協議
 により検印は
 廃止します。

著 者	かわ	もと	しゅう	ぞう
	川	元	修	三
発行者	森	北	常	雄
印刷者	竹	内	勝	之

発行所 森北出版 株式
 会社

東京都千代田区富士見 1-4-11
 電話 東京 (265) 8 3 4 1 (代表)
 振替 東京 1-34757 郵便番号 102

日本書籍出版協会・自然科学書協会・工学書協会 会員

落丁・乱丁本はお取替えいたします。

印刷 壮光舎印刷／製本 小高製本

3353-4626-8409

Printed in Japan

ま え が き

最近技術やオートメーションに対する告発が、社会的に問題になっている。また公害の元兇として犯人扱いされている。オートメーションは人間性をそこなうものとして反対の人も中にはいるかも知れない。果たして技術は悪者なのであろうか。技術も、しょせん人間の知恵から生れたものであり、われわれがその使い方をまちがったのではないであらうか。公害を防ぐためにも計測はますます進歩しなくてはならない。このように考えると技術の誤りを正すものはまずわれわれ人間の心の問題であり、それを具体的に解決するためには、やはりわれわれの知恵の所産である科学・技術に頼らざるを得ないのである。これは人間に課せられた宿命なのかも知れない。

さて、工業計測の分野は戦後急激な発展をみせた技術分野の一つに数えられ、そのために今までにも多くの良書、多数の便覧、全書、大系の類が刊行されている。いまここでまた“工業計測”と題する小著を筆することはどれだけの意味があるであらうか。いままで私は主として工業計測器、調節器メーカーの中で仕事をしてきた。その体験から工業計測という進歩の早い領域では新しい技術・知識を急速に取り入れていくことが必要な反面、ともすればその陰に隠れて見失いがちな基礎となっている考え方、物理的な意味、どうしてそのようなことをしなければならないのかといった目的意識などを理解することがたいせつなことを痛感した。そしてこのようなはっきりした目的意識をもつことが、技術がまちがって使用されない原動力にもなるのではなからうか。

たまたま近年工学院大学において計測工学や自動制御に関する講義を受け持つことになり、改めて工業計測とは何かを考える機会が得られた。そしてこの際いままでの考え方をまとめる意味もあり、また諸先生方のおすすめと森北出版よりのご助力により浅学をかえりみず筆を取ったしだいである。このような点から本書においては努めて工業計測の基礎となっているものに注目し、話を進めていくが、その基本的な考え方をいくつかのべておこう。

一つは工業計測はシステムであるということである。そして主役は情報で

あり信号であるという立場である。この観点からすれば工業計測は信号伝送系であり、情報処理システムの一部分であるかも知れない。しかし信号はなんらかの物理的な媒体を経て初めてわれわれの实在の世界のものになる。このため、次の基本的な考え方として各要素が物理的にどのような現象・法則に支配されているかを取り上げることにした。すなわち本書においては一方では信号・情報系としての見方、工業計測ではどんな信号が取り扱われ、また各要素がこれらの信号に対してどんな伝達特性をもっているかを考える反面、各要素が具体的にどんな物理的な働きをもっているのかをみることにした。もう一つ第3の柱として本書で一貫して考えてきたことはフィードバックの概念・考え方である。これは自動制御において主役を演じているが、その方法・手法・考え方は実は今日の工業計測の基本となり、あらゆる機器に応用されている。それゆえ工業計測系をみる場合、また機器の機能を考えるときにもフィードバック系として考えることは重要な意味をもっている。そこに現代の工業計測の特徴を表わしているといえよう。

工業計測に自動制御を含ませるか否かについては考慮の余地があるが、本書では限られた紙数でもありほとんどふれることができなかった。また各論についても到底このような小書では完全を期すことは無理であったが今後の課題として公害関係の計測技術について補足する必要を痛感している。

本書の内容は高専または大学初学年で、十分理解されうるものと考えられる。工業計測または計測工学を学ぶ人達の副読本、参考書としていただければ望外の喜びである。

最後に執筆をおすすめいただいた東京大学工学部 北郷 薫教授および引用させていただいた多くの文献の著者の各位に対し深く謝意をのべると共に、原稿の遅れその他たいへんに御世話になった森北出版の太田三郎氏に厚く感謝の意を表するしだいである。

1972年10月

川 元 修 三

目 次

まえがき

第 1 章 序 論

1・1	工業計測の目的	1
1・2	工業計測系の階層化と構成	5
1・3	工業計測の将来の展望	17
	研究課題	22

第 2 章 工業計測の基礎

2・1	工業計測量の分類	23
2・2	感覚量の尺度	24
2・3	ポテンシャル量と流通量	27
2・4	需給平衡法	29
2・5	多要素制御系	30
2・6	フィードバック系の考え方とその応用	35
2・7	計測と情報理論	38
2・8	計測とシステム理論	42
	研究課題	47

第 3 章 次元・次元解析

3・1	次 元	48
3・2	次元解析	53
3・3	無次元量とシミュレーション	57
	研究課題	60

第 4 章 精度と誤差

4・1	工業計測量の誤差	61
4・2	誤差の原因と種類	65

4.3	ガウスの誤差曲線	71
4.4	測定精度の表わし方	78
4.5	誤差伝播の法則	81
	研究課題	83

第 5 章 誤差の統計的処理

5.1	母集団・確率変数・標本	84
5.2	推定量	85
5.3	不偏分散	89
5.4	その他の推定量	91
5.5	区間推定	94
5.6	測定値の重み	100
	研究課題	101

第 6 章 測定値の処理

6.1	数値の取扱い方	103
6.2	曲線の当てはめ	107
6.3	最小二乗法による曲線の当てはめ	112
6.4	直交多項式による曲線の当てはめ	114
	研究課題	119

第 7 章 工業計測系の信号と伝達特性

7.1	信号の種類	121
7.2	インパルス応答・ステップ応答・周波数応答	126
	研究課題	139

第 8 章 微分方程式とラプラス変換

8.1	微分方程式による信号伝達特性の表現	140
8.2	ラプラス変換と伝達関数	154
8.3	三つの領域	162
	研究課題	164

第 9 章 ブロック線図・信号伝達線図と工業計測系の実信号

9・1	ブロック線図	167
9・2	信号伝達線図	169
9・3	工業計測系の実信号	174
	研究課題	184

第 10 章 計 測 法

10・1	直接測定と間接測定	186
10・2	零位法・偏位法	187
10・3	その他の計測法	194
	研究課題	199

第 11 章 変 換 素 子

11・1	機械的変換素子	201
11・2	光学的変換素子	203
11・3	流体的変換素子	206
11・4	電気的変換素子	216
	研究課題	223

第 12 章 工業計測各論

12・1	圧力計測	225
12・2	流量計測	234
12・3	温度計測	248
	研究課題	262
付	録	263
さく	い ん	267

第1章 序 論

1・1 工業計測 (industrial instrumentation) の目的

その主目的が物を生産することにある工業プロセスでは、いかに効率よくプロセスを運転するか、またよりよい一定品質の製品をいかに経済的に作り出していくか、社会に対し公害の発生がないかなどに主眼がおかれる。工業計測も結局はこの主目的を達成するための一つの方法・手段であることをまず認識する必要がある。この点が用いる手段・方法が同じでも他のたとえば物理計測¹⁾のように自然界の現象をできるだけ正しくは握し、われわれの知識をより豊かにする目的をもつものと区別されなくてはならない。

最近のように自動制御が発達する以前においては計測管理とか計量管理ということが広い意味の生産管理²⁾の一環として盛んに強調された一時期があった。これはさらにそれ以前のいわゆる作業員の勘にたよる運転からさらに1歩進んだものとして計器によってプロセスの状態を知り、それに基づいて運転をどのように行なうかの標準作業を確立し、それによって物を生産していくことであった。これは現在のことばでいえば情報処理と制御の部分人間が担当していたことに相当する。現在は多くの作業が自動化されたためなんのために計器があり、制御を行なっているかという本来の意義の認識がうすれつつあるように思われる。現在の段階では機械と人間をくらべてみた場合に、なんのために計測するのかというような問題意識や、また得られた計測資料や結果がどんな意味をもつのか、プロセスのどのような状態を表わしているのかといった分析の仕事は、とうてい機械では不可能で、やはりわれわれ人間が判断し、処置をとる必要が出てくる。自然の生物界においては必要なものは進化し、使用されないものは退化し全体として合理的な発展が自然淘汰によって進められていくが、機械やプロセスシステムではこれらは人間

1) 計測は目的・分野により工業計測・物理計測・化学計測・機械計測・電気計測・医学計測・管理計測・社会経済計測・公害計測など多くの種類に分類される。

2) 管理も制御も英語では共にコントロール (control) となり、フィードバックループをもったシステムとしての共通性が明瞭になる。

が考えてやる必要がある。よくプロセスに対する計測の関係は生体の感覚器官や頭脳や神経系と本体との関係にくらべられるが、頭脳だけでは生きられないように、計測の発達には、その本体であるプロセスの発展と並行して進歩し、バランスのとれたシステムの完成が望まれよう。よく初期の計測管理の段階では、なんでも計器や自動制御を行なえば、よい製品が安くできてくるものと思われた一時期があり、また、そのような要求が出されたことがあった。これは計測以前の問題としてプロセスの改善が第一であることを忘れてしまった結果といえよう。

将来はともかくとして現在の段階で工業計測が実施されている目的を大別するとつぎのようになる。

(1) 運転計測

プロセスの状態を知ること。工業プロセスとは原材料を生産設備に投入し、これに動力・人力・熱などのエネルギーを加え、いろいろな物理的、化学的操作により目的とする製品を作り出していく過程といわれている。そしていちばん重要なのは、このプロセスがどのような状態で運転されているかを知ること、多くの工業プロセスでは各部の温度・圧力・流量・液面などといったいわゆる状態量によってこれをは握し、これに基づいて標準作業が実施され、必要によっては自動制御が行なわれる。このようにプロセスの運転は刻々の状態量の値を知ることにより正しい操業が確保されており、この目的のための計測を運転計測とよんでいる。運転を目的とした計測では物理計測などと違い測定は絶対的、静的な精度よりも相対的な安定性、応答の早さ、信頼性などといった点に重要性があり、とくに制御に結びついた測定では、その結果がプロセスの運転や、製品の品質に直接に影響を与えるため、他の測定とはまた違った性格が計測器類に要求される。

プロセスの運転には上述の内部の状態量の計測にとどまらず運転に影響のある外部からの信号、たとえば外乱などの検出が有効なことがある。自動制御ではこれらを外乱制御といっているがこれは生体システムにおいても個体維持に必要な体内の諸因子の計測と制御が行なわれるばかりでなく、さらに外界からの働きかけや外乱を検出し、危険な外からの脅威に対して適切な処置がとれるよう各種の感覚器官が発達しているのに対比することができる。

(2) 品質計測

半製品・製品の品質を検査するための計測。プロセスに投入された原材料はプロセスの中のいろいろな工程を経て、半製品なり製品になって出てくる。プロセスがどんな具合に運転されているか、途中の処理・方法は適切であったかどうかは、出てくる半製品なり製品の品質をチェックすることによって判定することができる。このために通常、ある工程のあとには必ず検査の工程がおかれ品質を計測する必要がある。この場合よく間違えていわれることは結果的には製品の品質がよければ途中のプロセスの状態量がどうでも問題ではないのであるから、最終の品質をフィードバックしていわゆる終点制御 (end-point control) だけを実施すればよいという意見がある。しかしこの考え方で自動制御を行なった場合には、多くの場合失敗する可能性が高く、制御の基本はやはりプロセスの個々の状態量をまず制御してやり、プロセスをわれわれのコントロールの内に入れてから最終的には最終品質を計測制御することが正道のようである。これはもちろん品質計測の重要性を軽視するものでは毛頭なく、かえって品質計測のむずかしさを強調しているのである。すなわち、品質計測には化学的な諸量の計測が必要となることが多く、このための計器の未開発なこと、保守の困難さ、応答のおそさから品質計測器を制御ループに組み入れてオンラインでの使用を考えさせられるためである。たとえば各種の分析計が品質計測の目的に使用されているが、温度や圧力・流量といった状態量の計測とくらべて信頼性について若干のへだたりがあることは認められよう。次の問題点としては、最終的な品質の判定には人間の判断が必要な場合が多く、検査部門はどこの工場においても機械化・自動化が困難な所になっていることである。それは人間の検査機能は普通考えられる以上に複雑であり、簡単に機械や、計測器と置き換えることができないことにも原因している。装置工業の自動化はかなり達成されており、無人化も夢ではなくなったが、機械工業や、組立作業の多い工場においては自動化がおくれていることから明らかであろう。

(3) コスト計測

経済的な管理のための計測。工業プロセスも経済活動の一環として営まれる以上、コストを抜きにしてプロセスを運転するわけにはいかない。そのた

めに原材料や半製品・製品の数量、使用した動力やいろいろなエネルギー量などの計測、およびそれから算出される効率や原単位などが経済的な管理のために必要になってくる。またときには取引上に計測器類が使用されるが、この場合には計器の精度が直接に金銭的なつながりをもってくる。このようにプロセスに関する経済量の計測のためにコスト計測がなされる。コスト計測においてはいくつかの計測量から計算されなくてはならないことが多い。

(4) 公害・保全・安全計測

公害・保全・安全などに関する計測。直接に運転や製品の品質、コストに関係はないがプロセスを正常に維持運転するために必要な保全作業があり、またプロセスや、作業員の安全、衛生のための計測がある。最近では社会的な点から公害・環境の計測も必要になってきている。このような目的に使用される計測器は、たとえば保全、安全関係の機器のように、通常時には使用されることがなく、緊急必要時だけに確実に作動するものでなくてはならない。また公害についても、生産活動そのものは本来社会的にある役割を荷なっているものであるが、一部プロセスにおいて地域社会に害を与えるものがあることは本来の目的に矛盾するわけである。これらの公害に対しても正しい計測によって初めて工業プロセスがわれわれの管理下におかれ、豊かな人間性に基づく環境社会が約束されることになる。

(5) 試験計測

技術的資料のための実験的計測。将来の開発・改善のために日常的な計測のほかに、とくに必要な資料が要求されることがある。このような実験的な目的にもまた計測は不可欠であり有効に利用されなければならない。また新しい計測器、計測方法、制御系の開発の過程としても現場テストの意味から試験的な計測が行なわれることがある。以上のほかにも実際のプロセスにはいろいろな目的をもって計測が行なわれるが、要はその目的を十分に認識し、明確な判断のもとにその計測結果が有効に利用されなくてはならない。単に紙に記録された資料としてそのまま活用もされずに死蔵されることは、必要以上の過剰計測で無意味なものであろう。

以上を要約すると工業計測の目的はシステムとしてのプロセスの主目的に対して合理的な情報系を形成することである。むずかしいことばでいえば、

合目的的な計測制御系を作り上げることである。具体的にはその時点におけるわれわれの知識の総合として技術的な面が定まり、一方では経済的な効果の点からその実施が規定されるわけである。この意味から、電子計算機もわれわれは道具として利用しようという立場に立つわけである。目的が与えられ、それに対して種々な制限のもとに最適な方式・装置・機器を組み立てていくことが一般的に言えば技術そのものなのである。

1・2 工業計測系の階層化と構成

(1) 工業計測系の階層化

工業プロセスを物の面からみれば、生産設備に投入された原材料は、プロセスにおいて、動力や人力、熱エネルギーなどが加えられ、いろいろな物理的、化学的操作により、製品となって取り出される一連の流れであり、経済的な面からみれば、投下された原価に価値を付与するプロセスとみることができる。このように一つのプロセスも、これを物やエネルギーの面からみる見方、また価値や原価、コストなどの点からみる見方などさまざまな見方がある。工業計測においてはプロセスの状態や入出力量などを計測し、これを処理しやすい信号に変換し、伝送し、さらに適当な情報処理をほどこした後、必要によってはこれらの情報に基づき制御を行なうシステムとしてプロセスを考えるのである。工業計測は物やエネルギーを取り扱うのではなく、その目的はプロセスの運転に必要な信号、情報系を提供するもので、この点から生体における頭脳・神経系・感覚器官に対比することができる。生物が単細胞から進化して現在の人間のような高等動物まで到達したように、工業計測においても、最初から現在のような構成、システムができ上がっていたわけではなく、いくつかの進化の段階を経て発達してきたことは面白い類似性である。ここではまずこれらの工業計測系がどのように現在の構成をとるようになったか歴史的にみてみることにしよう。抽象的に発達の過程を論ずるよりも、例をあげて説明した方が理解しやすいので、流量計測を例にとって考えることにしよう。流体の流れの量を測定する必要性は古代の農耕におけるかんがい用水の配分の問題などからも、また近代工業においては各種燃焼炉の燃料や空気量の計測などにおいて計測管理の第1歩として考えられなければ

ならないことであった。工業計測の第1歩は、このような“必要性の発生”にあると考えられる。必要性が出て、初めてそれを満すものとして計測技術が発達してくる。一般にいわれているように“必要は発明の母”なのである。流体の流れの途中に抵抗物や絞りを置いたとき、その前後に液面の相違が表われること、また圧力差が発生することから流量の測定方法が発見されたのであろう。このように計測の第1歩は測定しようと思う量（計測量）をわれわれの感覚の対象となるものに変換することから始まるといえる。ほとんどの場合感覚として視覚、とくに変位、または角度に変換することが必要であった。これを図示すると図1・1のように計測量はある変換器（図では四角な箱で示してある）により出力として長さ、変位または角度の変化としてわれわれの感覚によって取り出される。この場合四角な箱の中味が何であるかを問題にせず、入力（計測量）と出力（変位）との対応関係だけに注目する考え方を暗箱（black box）的な考え方といい情報伝達や信号を考えるときにはよく用いられるやり方である。しかし技術的には箱の中味を何にするかが問題で流量計測の場合には“せき”や“絞り”などが技術的な対象となるのである。絞りの前後の圧力差はそ

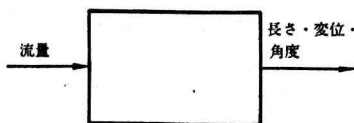


図 1・1 暗箱としての変換器

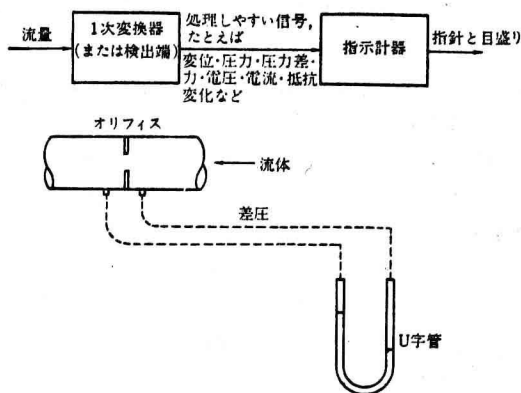


図 1・2 1次変換器と指示計器

のままでは変位にならないので、通常、液柱によるU字管を用いて測定される。すなわち図1・1の変換器はさらに詳しく考えると図1・2のように計測量は、われわれの取り扱いやすい処理、伝送しやすい物理量、通常は変位・圧力・圧力差・力・電圧・電流・抵抗変化などにいったん変換し(これを1次変換器、または検出端という)、そのあとでこれらの信号は処理伝送され、多くの場合目盛りと指針による指示計器によってわれわれの視覚にとらえられるのである。流量計測の場合にはオリフィスやベンチュリなどの絞りが1次変換器(検出端)に相当し、U字管が指示計器になるわけである。工業計測の第1歩はこのように計測しようと思う量をわれわれの取り扱いやすい処理、伝送しやすい物理量に変換する1次変換器の開発にあるといえる。このため物理的、化学的ないろいろな法則・原理・現象が応用されているわけである。工業計測としてはこれら1次変換器の開発だけではなくさらに指示計器の出現が必要であった。これは物理計測のように時間関係を含まない静的なものではなく、工業プロセスの運転では、そのときの運転状態を時々刻々知ることが必要であり、いわゆる直動形指示計器の出現が待たれたからである。これらの指示計器はもちろんプロセスの運転に直接必要なわけであるから、現場作業員の見やすい場所に設置、取り付けられていた。そのためこれらの計器はまた現場設置形の指示計とよばれていた。このような発達の段階は日本では終戦頃までつづいていた。この段階でも、それ以前の全く人間の勘にたよる盲運転に比べれば大きな進歩であり、指示計器を標準作業に組み入れることにより計測管理ができたのである。

このような指示計器時代の次に現われたのが中央管理方式および自動制御の導入であろう。プラントの大型化、測定個所の増大は1人の作業員が監視する計器類の数の増加を招き、それまでのばらばらの現場計器では運転が円滑に行なわれなくなってきた。また一方では1930年頃から徐々に発達してきたプロセス自動制御は、戦時中のフィードバック制御(feedback control)の理論の発達と相まって急速に進展し、それまで作業員が指示計器を見ながら調節弁を操作していた作業が機械に代わり、その後のオートメーション、自動化の発端を作ったのである。このためには従来の指示計器ではこれらの機能を遂行することが困難となり必然的に、信号の伝送のためには2次変換

器、計器の調節機能の付加のためにサーボ形計器¹⁾の出現がうながされた。

信号の伝送のためには、1次変換器からの出力を伝送に便利な空気圧信号か、電気信号に変換する必要がある、これが2次変換器である。ここでは信号の変換だけでなく、パワの増幅、信号の統一が行なわれる。流量計測にあたっての差圧伝送器がこれに相当する。図1・3にはこれらの系統をまとめて図示してある。また図1・4には初期の差圧伝送器としてのU字管差圧伝送器を、図1・5には最近の平衡式差圧伝送器を示した。直動計器と平衡式変換器の大きな相違点は、直動計器では指針を動かすパワは入力側から取るのに反し、平衡式においては外部より補助エネルギーを加え、フィードバックの原理を応用したもので、その出力パワは数十倍、数百倍に増幅されている。この

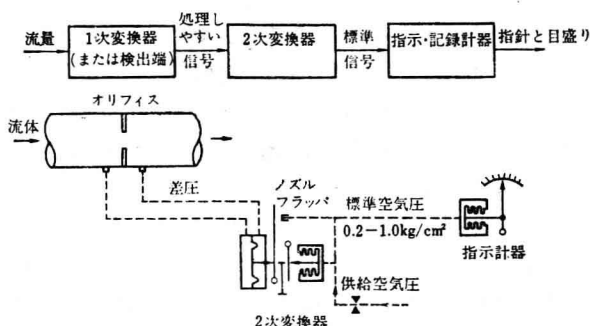


図 1・3 2次変換器を使用した計測系

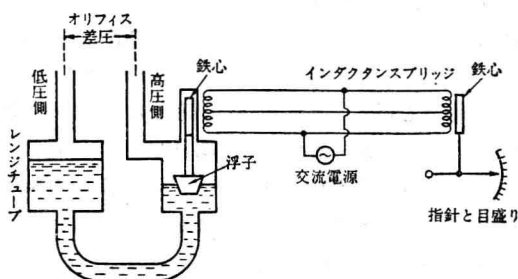


図 1・4 U字管浮子式差圧発信器

1) 10・2 (3) (b) サーボ形計器の項を参照

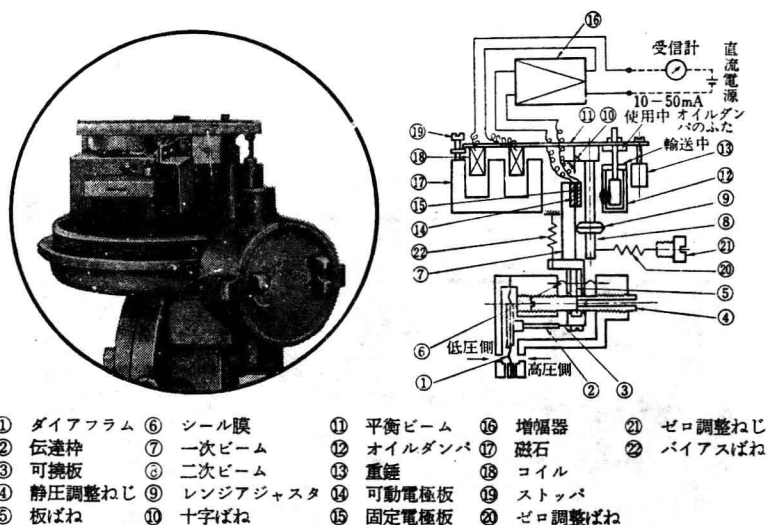


図 1-5 力平衡式直流 2 線式差圧発信器

ようにフィードバックの原理は単に自動制御としてプロセス制御に応用されるだけでなく、計測機器の細部に亘って広く適用されていることに注目すべきであろう。指示記録計器にこのフィードバックの原理を応用したものがいわゆるサーボ形計器である。

2 次変換器からの出力信号は最近ではほとんど統一されている。このためこれ以降の信号処理、制御機器の標準化が促進され、国・メーカの相違による困難が除去されている。2 次変換器からの出力信号は中央管理室に置かれた計器盤に導かれる。初期の計器盤には監視の容易な大型計器が用いられたが、統一信号による標準化により受信計器の統一、小型化が実現し、計測点の増大の処理、監視員の減少と相まってグラフィックパネルが出現した。グラフィックパネル (graphic-panel) とは計器盤の表面にプロセスのフローシート (flow sheet) を描き、相当する測定点に小型計器をはめ込むものである。これはプロセスの状態が一目でわかるという便利さがある反面、小型計器の使用によるパネル面の節約は実現されず、最近ではフローシートは別に描き、小型計器はまとめて配置するセミグラフィックパネルが多い。さらに