

自動制御の原理

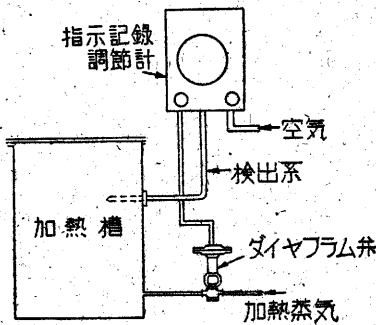
高橋安人

自動制御はいまや独立の新しい一分野になり、學問上も技術上も急速な進歩を
つづけ、20世紀後半の人類に大きな影響をおよぼすものとみられている。この稿
ではその全般を紹介、展望し、特にプロセス制御への應用を説明する。

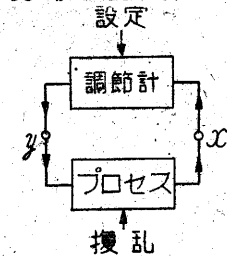
1. 閉じた動作回路

自動制御装置は壓力、回転速度など各種の量や條件の
値を希望値（一定のこともそうでないこともある）に近
く保つように動作する。第1圖は加熱槽の温度が上ると
蒸氣弁を閉じる自動制御例である。

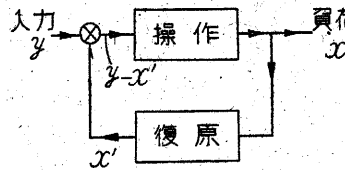
機械關係の表現
手段には断面圖が
あり、電氣方面で
は配線圖、化學工
業ではフローシー
トを使うが、自動
制御では第1圖の
ものを第2圖(a)
のブロック線圖に
書く。矢印のつい
た線が一方に向い
た線が一方に向い
た線が一方に向い
た線が一方に向い



第1圖 温度調節計つき加熱槽



(a) プロセス制御



(b) サーボ機構

第2圖 制御回路

第2圖が示すように自動制御では信號の傳わる回路が
閉じるものである。第1圖の例なら自動調節計が温度
(x)を測つて蒸氣量を加減(y)するが、その結果が(温
度を測ることによつて)常に確認監視されている。

動く被寫體をファインダでとらえ、重いカメラをこの
ファインダに追従させる場合のように、位置や角度の希
望値が變り、物體の位置や角度を速く正しくこの希望値

に合せたいことがよくある。これに使う位置や角度の追
従制御系をサーボ機構とよぶ。これは第2圖(b)に示す
ようにやはり閉じた回路につくられる。(別稿「サーボ
機構」参照)

2. 制御動作

自動制御は新しい分野であるために、各國で専門用語
の混亂がおこつた。そこで用語と定義類の整理統一が必
要になり、アメリカでは機械學會が1945年に自動制御
用語集を發表した。イギリスでは標準局(BSI)がこの問
題をとり上げてプロセス制御關係はすでに發表されてい
る。ドイツでも本年2月にDIN原案として用語集がまと
まつた。わが國では文部省の総合研究5002のグルー
プが一目標としてその基礎調査に着手した。

さて、これら標準用語の多くは、自動制御の動作を制
御變數偏差xと調節端位置y(第2圖a)とに注目して分
類している。この分類からおもなものを拾うと、まずy
のかん數とxの間に比例關係を豫定する連続動作には、

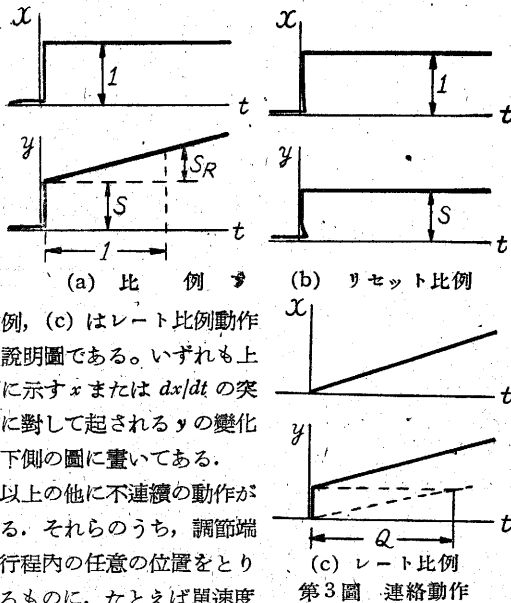
- (a) yがxに比例する比例(位置)動作
 - (b) dy/dt (tは時間)がxに比例する(比例)速度動作(積分動作)
 - (c) yが dx/dt に比例するレート動作(微分動作)
- がある。(a)と(b)を加えたものをリセット比例動作
という。(c)は常に(a)またはリセット比例動作に
つけ加えて使う。

上の3動作をもつリセットレート比例制御を式で書く
と、

$$\frac{dy}{dt} = S \left(Rx + \frac{dx}{dt} + Q \frac{d^2x}{dt^2} \right)$$

式中のSは比例感度、 $R(1/mn)$ はリセット率、 $Q(mn)$
はレート時間であつて、それぞれが上記(a)~(c)の比
例常數をなす。Q=0ならリセット比例式、さらにRも
0なら比例式になる。

これらがプロセスの連続制御の代表的規範をなす“制
御法則”であつて、第3圖(a)は比例、(b)はリセット



第3圖 連絡動作

比例, (c) はレート比例動作の説明図である。いずれも上側に示す x または dx/dt の突變に對して起される y の變化が下側の圖に書いてある。

以上の他に不連続の動作がある。それらのうち、調節端が行程内の任意の位置をとり得るものに、たとえば単速度動作がある。これは x のいかによつて調節端が一定速度でいずれかの方向へ動き、 x が希望値近くの小範圍にあるときだけ働かないものをいう。

また2位置動作では調節端位置 y が二つにかぎられてしまう。これと似たものに強, 中, 弱の3位置式などがある。

さらに間歇的にある時間間隔ごとに制御動作を行う断続動作もある。

つぎにプロセス用自動調節装置の構造を、2位置式のように簡単なものから順次に紹介する。

3. 自動調節器および調節計

プロセス用自動制御装置は、つぎのように各種の見地から名前がつけられる:

(a) 何を制御するかによつて、温度調節器、爐壓調節計などとよぶ。

(b) 自力か、そうでなければ補助動力の種類によつて空気式、油壓式、電気式、電子式; また構造により噴射管式、落下弁式など、さらに指示計や記録計を兼ねた調節計か、そうでない調節器または調節装置かを區別する。

(c) 制御動作の種類

(d) 設定點(下記)へ他の時計仕掛、検出系または制御装置が作用するときはその構成方式による區別。

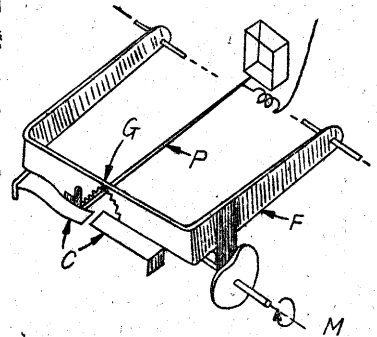
つぎに (b) 以下の區別によつて市販の装置のいくつかをあげよう:

オンオフ式調節器 これは2位置動作である。サーモスタットのように電気接點を開閉するものが多い。

制御變數が希望値より高くなると接點を切り、下と入れる (またはその逆) 簡単な制御動作であるが、プロセスの性質によつては、オンとオフの強さと希望値近くにおく餘裕とをうまくとれば、これで十分に制御の目的

を達することができるので、廣く用いられている。

落下弁式調節計 温度測定用ミリボルト計のような検出系を使うときは、直接に接點を開閉させるに足る操作力が得られない。こうした場合に簡単に力を大きく増幅するのが第4圖に示す落下弁の機構である。これは同期電動機でまわすカム M によつて、落下弁 F を、10餘秒に1回の割合で押し下げて、指針 P の位置を確かめる原理である。

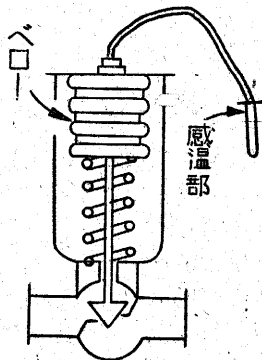


第4圖 落下弁機構

針が希望値を指すときは圖示の切欠き G があるために接點 C を動作しないが、これから離れるにつれて C を押す時間が變るように、切欠きに段をつけることが多い。このように開閉される接點がプロセスにはたらく直接の電源のこともあり、操作電動機などを支配することもある。圖には示していないが、切欠きの位置が(希望値を變える)設定機構によつて自由に調整される。

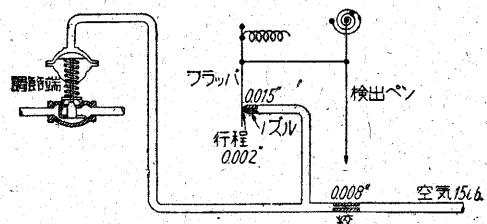
落下弁式の特徴は簡単な構造で確實な大きい操作力を得る點にあり、温度のように變化がゆつくりして10餘秒の断続周期が苦にならない方面に廣く用いられている。條件によつてはこうした断続動作がかえつて良好な結果を生むこともある。

比例式調節器 第5圖はガスが蒸氣を封入した検出系で直接に加熱蒸氣弁を操作する温度調節器である。壓力やレベルなども同じような原理の簡単な装置で自動制御できる、第5圖のような方式の制御動作は、上に記した比例式であるが、比例常數 S が大きいので制御しやすいプロセスでない



第5圖 ベローを用いた温度調節器

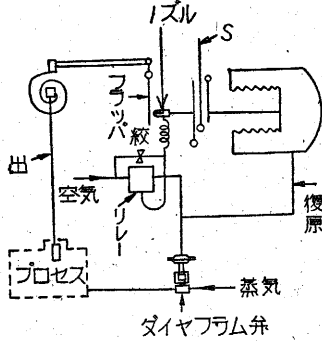
と使えない。



第6圖 空氣の利用

どの摩擦に大きく影響される缺點があるが、たとえば第6圖のように壓縮空氣を補助動力に使うとこの缺點が除かれる。圖はフラップの動きで變るノズル背壓によつてダイヤフラム弁を操作する方式を示す。ただしフラップが0.002"動くとノズル背壓が一極限から他の極限まで變るので、比例常數Sはやはりきわめて大きく、事實上オンオフに近い動作しかできない。Sを小さくするにはつぎに記す復原が必要になる。

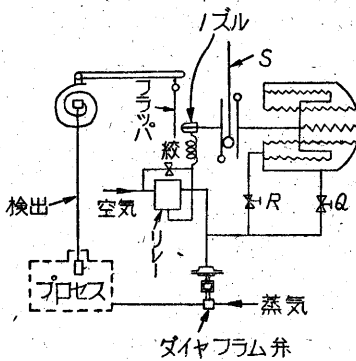
復原の利用 第6圖の裝置を、弁への空氣壓力の復原によつてノズルがフラップを追つて動くようにすると第7圖の構成になる。この復原によつて、上記の比例常數Sを十分に小さくすることが可能になり、圖示のリンクSの上下によつてこれが調整される。なお圖中のリレーは弁壓力をノズル背壓にす



第7圖 比例調節計

みやかに追従させるためのものである。

リセットやレート動作も復原によつて實現できる。第8圖がその例を示す。弁Rを開くとこれからまれてベローへはたらく空氣壓力のために前記の復原作用が緩やかに消されてゆく。これは近似的にリセット動作となる。また弁Qは復原ベローへの空氣壓力傳達をおくらせるので、狀況變化(フラップの動き)が速いほど、その瞬間だけは(第6圖のものに近く)見掛けの“S”が大きくなる。これがレート動作をなす。



第8圖 リセット比例調節計

以上は(Taylor社)の空氣式調節計を例にとつて説明したが、諸動作の實現手段は補助動力の種類とも相まつてたくさんにある。

また第6~8圖には希望値の設定機構が記してないが、實際の裝置ではフラップが(検出値を記録する)ペンの位置と、希望値を指示するインデックスの差によつて動かされるようになってゐる。

さて、このインデックスを時計仕掛でまわるカムによつて動かすようにすると、對時豫定制御が行われる。これは特定のサイクルを行う熱處理やパッチプロセスの自動

化に使う。流量比を一定にしたときは、一方の流量を測つて他の流量調節器の設定機構を支配する。これを**比率制御**という。

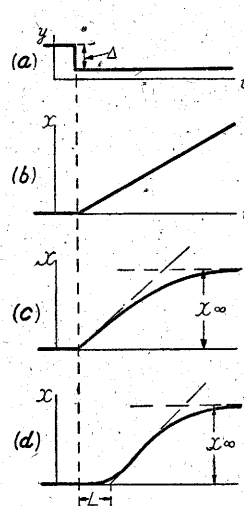
變數が多いとか擾亂が複雑で、單一の自動制御ではうまくできないときには**多段制御**が役立つ。たとえばボイラの自動制御(A.C.C.)では蒸氣需要(負荷)を測つて燃料その他の調節裝置の設定點を動かす。

以上のような諸裝置を、各種の記録計、指示計、安全裝置、遠方操作裝置、連動機構などとともに總合配置して生産作業を合理化するのが計裝(Process Instrumentation)であるが、その實例¹⁾はこの稿でははぶく。

4. プロセス制御論

上記のような諸調節裝置をプロセス制御へ応用する場合には、まずプロセスに適合した特性のものを選ばなければならない。この検討を行うにはプロセスの動特性を知る必要がある。

普通の設計データは靜特性を示すに止まることが多い。このデータから微分方程式によつて動特性が推定されることもある。しかし多くの工業プロセスではこれは困難だし間違つておそれもある。すでに設備またはその前例があるときは、最も手輕な方法の一つはインディシャルレスポンスを求めることだろ



これは制御していないプロセスについて、第9圖(a)のように調節端をとつぜんになるべく小さい寸法)Δだけ動かしたときにおこる制御變數の記録である。(b)~(d)はその見本を示す。(b)は液面、(c)は壓力、(d)は温度のプロセスによくある型である。(c)、(d)のようにやがて自ら平衡するものを自己制御性があると稱し、(b)と區別する。ω₀/Δでその程度が測られる。自己制御性が強いほど制御しやすい。

第9圖 プロセスのインディシャルレスポンス例 (d)が(c)と特に違つたのは、圖示の“L”だけの時間おくれ(むだ時間, dead time)である。これは流速が有限であることや、反應の時間や、(c)のような特性の果積によつて生じ、制御結果を非常にそこなう。すなわち制御したときの過渡偏差を大きくし、サイクリングをひどくする。

サイクリングとは制御變數の波狀變化であつて、プロセスへ調節計をつけて第2圖(a)のような閉回路をつくと、連續制御においてもこれが起り得るようになる。

たとえば第 10 圖(a)のように負荷が突變すると、(b)や(c)のような制御變數變化をおこす。

この点では概して位置動作の方がサイクリングを起し難い、つまり安定であるが、第 10 圖(b)のようなオフセット(永續偏差)を伴う。これにリセットをつけると(c)のようにオフセットを拭い去るが、リセット(R)が弱いと偏差が消えるまでの時間がのび、強すぎるとサイクリングを激化する。制御動作の強さと安定性については、これと同様のことが比例(S)およびレート(Q)動作についてもいえる。

以上のような検討を進めると、プロセスの性質(第 9 圖)に應じて、これに適合した制御動作やその強さの調整値を推論することができる。たとえば第 10 圖(b)、(c)のようなインディシャルレスポンスが制御變數の定常値との間に包む“制御面積”を最小にすることを制御の最適条件と指定すれば、上記の推論が定量的になるが、これはすでに紹介した²⁾から省略する。同じ方向の研究は其のごも発表されている。³⁾

工場環境、条件、豫算などによつて、採用すべき制御装置の種類や形式が左右されるのは當然であるが、それに劣らず重要なのは上記のような検討によつて、プロセスに適合する制御方法を考えることだろう。この検討には制御動作の種類ばかりでなく、検出や調節の方法、形式、構造なども加えなければならない。

さて第 2 圖のように簡単な回路では第 9、第 10 圖のインディシャルレスポンスについて上に概説した手段で、ほぼ目的を達する場合が少くないが、もつと複雑なものになるとさらに専門的な制御理論が必要になる。たとえばある蒸溜塔の液面と温度の制御系で、液面の検出値によつて加熱蒸気量を制御し、温度によつて加熱物流量を制御する方が、普通に考えられる液面で流量、温度で蒸気量を制御する方式よりもすぐれているとの理論さえ発表されている。⁴⁾

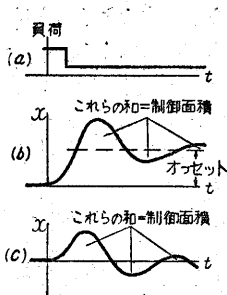
このような検討を行う第一歩は、制御方式の構想を第 2 圖のようなブロック線圖に書いてみるにある。それだけですでにヒントをつかむ場合もあるが、このブロック線圖についてさらに進める理論としては、この 10 餘年來サーボ方面で發達した傳達かん數法が役立つ。つぎにその進歩の一端⁵⁾を紹介する。

5. 制御理論の發達

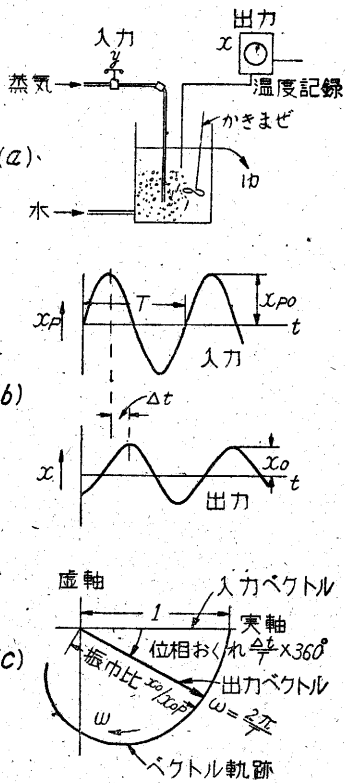
第 11 圖(a)は水に蒸気をふきこんで湯にするプロセス

である。この蒸気量をコックの周期的運動で波状に変え、その蒸気が流水と即刻に混合すると假定したときの湯の温度 x_p は(b)圖上側のようなものと熱勘定から推定される。

しかし實際に記録される温度 x はタンクの容量や記録の時間おくれなどがあるために、(b)圖下側のようなになる。これらの量がいつも比例する線型要素に對しては、 x_p 曲線が正弦波のとき x 曲線も同じ周期 T の正弦波となり、兩者の關係は振幅比と位相差とで表わされる。正弦波をベクトルで考え、 x_p すなわち入力ベクトルを正の實軸上に“1”の長さにとると、第 11 圖(c)のように



第 10 圖 制御回路のインディシャルレスポンス例



第 11 圖 要素のベクトル軌跡

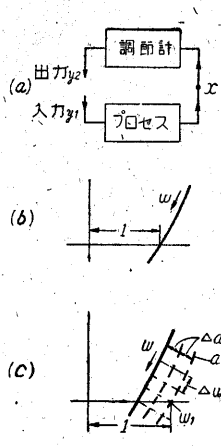
x すなわち出力ベクトルが上記の振幅比と位相差を直接に示す。

この出力ベクトルは周期 T (角周波數 ω) とともに變り、第 11 圖(a)のような場合には T の減少 (ω の増加) とともに振幅比が減り、位相おくれが増す。したがつて 3~5 種類の T について實驗を行い、それぞれの出力ベクトルの先端の點を連ねると、 ω を目盛にもつた曲線ができる(第 11 圖 c)。これをベクトル軌跡という。これはその線型要素の動特性を一義的に代表する點で第 9 圖のインディシャルレスポンスと全く同格である。

このようなベクトル軌跡(またはその複素數表示形——傳達かん數)を使うと、複雑な制御回路問題——回路が単一でないとか、2 以上の變數が共存して影響し合うような場合などもわりあいにやすく計算できる。

たとえば第 12 圖(a)は第 2 圖(a)の制御回路を一點で切斷して、プロセスと調節計の直列要素系のベクトル軌跡を求める原理を示す。第 1 圖の例ならダイヤフラム弁をはずして加熱蒸気管へ別の弁をつけ、後者を振動狀に開閉してダイヤフラム弁の動きをみるわけである。いま筆者はこの方法である制御問題(日本機械學會誌に近く發表)を研究中である(口繪参照)。

このベクトル軌跡は理論上各要素のベクトルの積と一致する。そしてこれがもし第12圖(b)のように+1の点を通るならば、第12圖(a)の回路を閉じたときに、振幅の減衰しない自励振動のおこり得ることを示す。なぜなら+1点では第12圖(a)の入力 y_1 と出力 y_2 とが振幅も位相も等しいからである。これが1932年に発表されたナイキストの安定判別法の原理であるが、この手法が特にサーボ理論で発達するにつれてさらに擴張されてきた。たとえば開いた回路のベクトル軌跡が第12圖(c)のように+1点より安定な側を走るときに、+1点の近くに圖示のように $\Delta\omega$ の間隔と $\Delta\omega = \Delta a$ の Δa の間隔の網目を考えると、+1点を通る線のもつ ω および a の値(それぞれ ω_1 , a_1 とする)が推定でき、第10圖(b), (c)のような波形の第1次近似を $e^{-a_1 t} \sin \omega_1 t$ とみることが出来る。



第12圖 開いた回路のベクトル軌跡

これは一例であるが、サーボ関係ではベクトルの状況から判断して組織的設計を進める手法が発達している。⁶⁾ また、これから制御の良否を推定する方法⁷⁾とか、統計論と結びついた検討法などもある。⁸⁾

前節(4)に記したインディシャルレスポンス(過渡特性)と、以上の周波特性とを結ぶ理論はラプラス変換とラプラス逆変換になる。これを具体的に数値計算して過渡特性から周波特性を求め、⁹⁾あるいは特に重要な逆変換を行う方法¹⁰⁾も學界をにぎわし、そのための簡単な計算機の發明が待望されている。

以上はおもに線型理論の紹介に終始したが、摩擦やバツトラッシュなどの非線型性の影響、¹¹⁾不連続¹²⁾または断續動作の理論¹³⁾についても多数の論文が發表されつゝある¹⁴⁾ことを付言しておく。

6. サイバネティクス

豚肉が値下げになると飼育量がへる、そのためにまた値が上つてくる——經濟界にも閉回路現象があるように考えられ、“悪循環”なる言葉は第12圖(b)のようなこ

とを暗示するようにも受取れる。

人體の脈はくや血壓などは巧に自動制御されているとみられ、醫學ではこの作用を Homeostasis と名付けた。また手足の動作はサーボ機構の原理で支配されるといわれている。

アメリカの巨大な電子式計算機類は生體の神経系統と比較されるような配線からでき、本式の“考える機械”へ近づきつゝあると傳えられている。

麻酔の深さを測つて薬量を自動制御する醫療機械ができ、200年前の调速機から發達してきた自動制御装置は、その回路のなかに人體の内部機構まで包含するに至つた。

人體と機械が一つになる運動系たる航空関係では、操縦士の動特性をベクトル軌跡でしらべる研究が問題になつている。¹⁵⁾これはカミカゼとは全然違つた意味での“人間サーボ”といえよう。

以上の一連の話題は自動制御論がもつと廣い特殊分野に連ることを示す。この新分野はいち早くアメリカの Dr. Wiener らによつてサイバネティクスと命名され、工學者や理學者から醫學者、生理學者、經濟學者らをふくむグループが2次大戰前から活動している。¹⁶⁾日本には未だこうした動きが見られないようだが、何事も10年以上は遠慮して待つことが東洋の禮節ではあるまい。

文 献

- 1) コントロールエンジニア——自動制御の實際資料、高橋安人編、1951、誠文堂。
- 2) たとえば、最新の化學工學、化學機械協會編、1950、丸善、160頁、第2表。
- 3) P. Hezebroek, B.L. van der Waerden, Trans. A.S.M.E., Vol. 72, No. 3, 1950-4, W. A. Wolfe, 同上, Vol. 73, No. 4, 1951-5.
- 4) W. Oppelt, Chemie-Ing. Tech., 1951-2, 39.
- 5) 科學測器學會編、科學測器の進歩、1951、17も参照。
- 6) G. S. Brown, D.P. Campbell, Principles of Servomechanisms, J. Wiley, 1948.
- 7) 伊澤計介, 1951-2-24, 日本機械學會第515回講演會前刷, 31, および本誌35頁。
- 8) H.M. James 他2, Theory of Servomechanisms, McGraw-Hill, 1947.
- 9) 増淵正美, 1951-2-24, 日本機械學會第515回講演會前刷, 35.
- 10) R.L. Johnson, J.B. Rea, J. of Aeronautical Sci., Vol. 18, No. 1, 1951-1, 43, など。
- 11) A. Tustin, Journal, I.E.E., 94, IIA, No. 1, 1947 など。
- 12) T.A. Rogers, Trans. A.S.M.E., Vol. 72, No. 8, 1950-11, など。
- 13) W. Oppelt, Elektrotechnik, Bd. 2, Nr. 3, 1948-3, など。
- 14) 本誌, 35頁。
- 15) A. Tustin, Journal, I.E.E., 94, IIA, No. 2, 1947, R. Mayne, Elec. Engg., 1951-3, など。
- 16) N. Wiener, Cybernetics, J. Wiley, 1948, J. of Franklin Inst., Vol. 251, No. 1, 1951-1, 65.

高橋安人編

コントロール・エンジニア

—自動制御の實際資料—

B5版 120頁 定價 250圓 十 30圓

誠文堂新光社發行