自動制御の歩み

—昭和32年5月2日受理—

東京大学生産研究所 高 橋 安 人

要旨：—自動制御の歴史は古いが科学的手法は2次大戦中にサーボ機構の研究から確立された。周波数応答法がそれである。戦後はこの理論と、夥しい新鋭部品と、自動制御への要求とから、一層の進歩の刺激となる競争の時代に入ったようだ。この進歩は“制御装置”ばかりでなくシステム全体にも影響しようとしている。ゆえに広く工業界に基礎概念の浸透することが望ましいがこの点でも日本の水準は世界にひけをとらないように思う。

“Art から Science へ”。これが自動制御の歩みであつた。自動制御に関する本式の体系が築かれ実用化されたのは戦後のことであるから、実に長い歩みであつた。燃料および燃焼の分野に本式の自動制御が使われはじめたのは約30年前、1930年前後からである。アメリカでは石油工業その他へ空気式自動制御が普及、ドイツでは鉄鋼工業その他で油圧式自動制御が発達、またボイラの自動燃焼調節にはこれら両方式と電気式とが発達した。熱起電力とか抵抗線を用いて温度を測ると落下棒式や機械的自動平衡計に頼らなければならないなどの不自由はあつても、自動制御時代はすでに戦前からこの分野に訪れていたともいえるだろう。

しかしこの時代の発達の大部分はもっぱら経験に立脚するものであつた。理論はあるにはあつた。しかしそれは制御装置とか制御対象、したがってこれらを総合してのシステム全体の動的特性を表わすのに微分方程式を使うものであつた。これはきわめて複雑でとても技術者が実用に供し得る形ではなかつた。こんなわけで実家が性能を評価したり発達を図るには“Science”より“Art”によらなければならなかつた。自動制御研究会の10周年を祝つて来日したボイド氏(本号566ページ参照)はこの状況をつぎのように描写している：

機器を売込みにきたセールスマン A と顧客 B との会話：

B; “Is it good?”

A; Yes, it's good.”

B; “How good?”

A; “Very good”.

類似の話は以前に他のアメリカ人からもきいた。それによるとある製造会社のごときは製品の優位を保持するために“自動制御装置”なるものの周りに神秘的衣がめぐるされておる状況をむしろ歓迎する様子さえあつたという。

第2次大戦から戦後にかけて自動制御の分野には革命的变化がおこつた。その一つは後に起す理論の確立と実用化であり、もう一つは機器とその部品の相つぐ進歩発達と競走の激化である。たとえば上に記した落下棒式や機械的自動平衡式に代つて電子管式の自動平衡機器が登場した。しかもそれが早くももつと新しい方式——摺動抵抗のような可動部分を全く持たない新型純電子式におびやかされようとしていることは、ボイド氏の論文にみられるとおりである。

このような眼まぐるしい進歩の一つには電子工学の発展や磁気増幅器、トランジスタ、パラメトロンなど新しい素子の相つぐ出現による。しかしもう一つの有力な原因としては自動制御の普及につれ性能や経済性に関する顧客の要求が高くなりはつきりしてきたことが挙げられる。

何かが流行すると優良品ばかりでなく必ずまやかしたものも出る。このさい買手の方に玉と石を区別する能力を欠くと良品は不良品に圧倒されるばかりか不評の責任まで負わされることがある。しかし反対に買手に高い眼があると不良品は自ら消え、良品同志の競争が激化する。公平ではげしい競争は一層の進歩へのきつかけとなる。原因と結果がこんな具合に循環して進歩の主軸となることはよい意味のフィードバック現象に他ならない。——自動制御そのものがフィードバックの原理を使い、制御した結果(たとえば炉の温度)を測つて原因側(たとえば炉へ送るガス量)を支配する

1) たとえば寒川武, 自動制御の理論と実際, 日本機械学会, 1948.

第1図 フィードバック

ものである。(図1)

上記のようなフィードバックの妙味を発揮するには客観的評価が可能でなければならないが、一たび自由競争のフィードバック現象がはじまると、いつまでも神秘の衣に頼って客観的評価を避ける者は落伍する可能性も出てくる。ボイド氏が在京中に彼が愛用のカメラに日本の誇るレンズを買う手伝いをして図らずも一つの挿話を経験した。彼はレンズを買うさいに、その解像力のデータを添付するか、または彼の提示する解像力を満足するという保証を要求した。これに対し一つの会社の反応はこんなだった：

“ボイド氏の提示した解像力は途方もないもので、それをみたすレンズは世界中にありはしない。当社製品の性能は世界に誇るものであるが、その解像力を公表することはできない。”

他の会社は自社製品の性能データを伝えた。それはボイド氏の提案値をかなり下まわるものではあったが、彼にとつて不満足な性能ではないことがわかつたので、彼はそれを買った。そしてこんな話をした。

“アメリカの制御機器メーカーのしにせのなかにも誇高く頑固で秘密主義のがある。いまその社は斜陽のようだよ。”

ところで公平な競争がおこつて優良品が伸びるといふフィードバックが働くために必要な客観的数量的の性能表現手段——それも簡単で誰にでもわかりやすく使いやすいもの——がやはり大戦中に自動制御界に登場した。下記のボイド氏の論文にも使われている周波数応答法がそれである。これはアメリカで行われたサーボ機構(角度や位置の自動制御、主として遠方操作)の戦時研究で、それまでの微分方程式法(の行詰りを打破するものとして現われた手法である。

周波数応答法の原理はきわめて簡単で、すでに多くの参考書に出ている²⁾。たとえば炉への燃料送給弁の開きを(一定の開度の前後に)正弦波状に変えると炉内の一期特定点の温度も同じ周期で正弦波状に上つた

2) たとえば、高橋安人、自動制御理論、1954、岩波全書。

第2図 周波数応答

り下つたりする(図2)。この場合には炉というシステムへの入力(弁の開き)で、その応答(出力)が温度である。入力に対する出力の振幅の比は、加える正弦波の周期が短くなるほど減少する。大きな炉の温度は、燃料を10分以上の長い周期で増減すればたしかに上下するが、数秒の短周期では火焰輻射や熱ガスの直射でも受けない限り温度に作用しないことは自明の理だろう。また入力に対する出力の位相おくれは周期が短くなるにつれ増大する。1時間周期の入力正弦波と出力正弦波を1枚の記録用紙にプロットすれば、両者間にほとんど位相差はみられない。これに反し数分という短周期の正弦波では、熱容量などによる時間おくれの作用が1周期を360°とする角度に換算すると大きな値になるのである。

さていまの例でいうと炉というシステムの動的入出力関係すなわち動特性は正弦波状入出力の振幅比と位相差の周期(または周波数)に対する推移によって表わされる。横軸に周期または周波数をとって振幅比と位相差とをプロットしたものが周波数応答線図で、これが上に記した客観的データとなるのである。

周波数応答線図で問題とする周波数範囲はデータの使用目的によつて違う。周波数ゼロ(周期無限大)が定常状態すなわち静特性(炉の例でいうと燃料送給量一定で炉内温度が一定におちついた平衡状態)を表わし、理論上は完全に動特性を示すには周波数ゼロから無限大までの全範囲をとらなければならないが、実際はかなり限られた周波数範囲で間に合う。

たとえば記録計の応答の速さを評価するには高周波側の周波数応答に注目すればよい。爆発現象を正確に記録したければ、毎秒数サイクルまたは数十サイクルのところまで振幅比が一定に近く位相おくれも少い“hi-fi”の特性を要求する類である。

フィードバック制御系全体の性能として注目されるのは応答の速さばかりでなく特に系の安定である。この場合には構成要素を一括しての位相おくれが180°を横切る近傍の周波数帯が主問題となる。たとえば炉の

温度調節器が比例式、すなわち測つた温度が希望値より高いか低いかにより、希望値と測定値との差に比例する分量だけ燃料弁を開じるか開くかする場合を考えよう。ある特定の周期の周波数応答状況下において、もし弁が正弦波状に開きはじめようとする瞬間に、弁から炉を通じて温度変化にいたるまでに含まれる位相おくれが丁度 180° であるために、温度の方は丁度正弦波状に下りはじめるとすれば、温度調節器はこの温度変化に比例して弁を正弦波状に開きはじめようとする——もし調節器の比例定数が、弁から炉を通じて温度変化にいたる部分の振幅比の逆数に等しければ、いま想定した正弦波状変化は、外から弁を駆動しなくても、調節器→炉→調節器という具合に自らぐるぐるまわつて存続することになる(図3)。これがハンティン

第3図 180° のおくれ(比例制御の場合)

グすなわち安定限界であつて、実際の使用状態では振動が自らおさまる安定なものではないから、調節器の比例定数(ゲインという)は上記の安定限界値より低くしなければならない。

ここに安定限界条件は、それが制御対象の制御のし易さを示すこと、また安定限界における振動周期が制御によつて抑制し得る外乱の速さの限界を示すことの2点により重要である。安定限界に相当する調節器のゲインが高いほど制御対象は制御し易いことを意味する。また安定限界における振動周期が短いほど、速い外乱でも制御作用で相殺できること、換言すればその制御系の動作可能な周波数範囲(バンド幅という)の広いことを表わす。

以上のようなシステム全体の検討に周波数応答法が有力な武器^①となる一つの大きな理由は、システムを構成する素子(測る部分、調節器、弁、制御対象)のそれぞれの振幅比、位相曲線を、一部分対数目盛を用いた方眼紙にプロットすると、紙上の寸法の加算によつてシステム全体の特性に一括することができるという便利な性質があるからである。すなわち設計者は簡

3) 本号に掲載のボイド氏の論文では周波数応答法をこれまでの自動制御論でやや閉却視されてきた他の重要な特性すなわち“感度”の検討にも適用している。

々のシステム構成素子の特性に注目しつつ全体の特性が所定のものになるようにこれらをまとめ上げていくことができる。

“システム工学”なる新語はこうして周波数応答法、自動制御に密接な関連をもつて生れた。これは箇々の素子をシステム全体の立場から、最適の形へとまとめて上げて行く進み方を強調することばである。この立場からすれば、たとえば管を流れる液体の流量制御系に昔風のオリフィス前後の差圧を水銀柱で測る素子を用いたとすると、システム全体のバンド幅がのろまな水銀柱—浮子系におさえられて、急激な上流または下流圧力変化による流量変化を制御する能力を欠くことがわかる。新型の差圧発信器がいかにかシステムの性能を改善するかも直ちに明示される。

以前には自動制御用機器は、既に存在するかまたは動かすことのできない威厳をもつ青写真の制御対象へとりつけられるべき(つまり附属品であるところの)“黒い函”とみなされていた。システム工学の立場からするとこのような差別はない。システム全体が検討の対象となる。たとえばTV受像機のオートメーションによる大量生産は特に印刷配線により可能になった。この印刷配線は受像機自体の設計に大きな影響を与えている。他の極端な例は農業におけるオートメーション(この場合はむしろ機械化)にみられよう。たとえばトマトの場合に、播種から生育までは散水、施肥などすべて機械化できるが、果実の採取だけが手作業に残された。筆者が昨年カリフォルニアに居たとき行われていた研究は、既にできた収穫機械で扱えるような(皮が軟かすぎないなどの一連の条件とみなす)トマトの品種をつくり出そうとするものであつた。

新しい分野——たとえば動力用原子炉など——では最初からシステムとして出発している。これに反し歴史の古い分野では、これまでこのように行われてきたというだけの理由が最も有力であつたりする。燃料や燃焼関係のシステムのなかには、今日利用し得る“黒い函”の能力とあわせて考えたら、かなり思い切つた改造の余地をもつものが含まれているかも知れない。

このような将来への見通しと、フィードバックの理によつて力強く伸びてくために必要な前記の事情とから考えると、自動制御の大きい問題は機器の開発をする人たちの手中ばかりではなく、むしろ技術者全般の水準と新知識の滲透の速さにあるものと推論できる。広い意味での工業教育の重要性がここに浮び上つてくる。多くの自動制御の専門家たちは、無数の新問題と

取組むかたわら，そうした広い意味での教育にもか
 かりの時間を割いてきた。その効果はどうだろうか？

一般に新しい知識が消化され，拡散していくの
 は意外に時間がかかるようだ。たとえば一つの会社で
 周波数応答法をものにして，市販の機器の比較試験を
 開始するまでには，いつの間にか数年の歳月が流れて
 しまう。おまけに新しい分野には，耳なれない用語
 や概念がつきものである。こんなわけで時には歩み
 がおそく感ぜられることも止むを得ないが，現在の日本
 の一般水準をアメリカのそれとくらべると，私の眼に
 何の遜色も認められないのはうれしい限りである。自
 動制御研究会の人たちその他のこれまでの努力はこの
 意味からも高く評価されてよいと思う。

ここで一つだけ気になるのは，一般の関心が高まる
 のに乗じてまやかしの出る可能性である。機器のまや

かしについては上にふれた。学界の方はどうだろ
 うか？ 内外の研究論文を真似ながら，もとにした原文
 は引用さえしないと，創意や意義に乏しい実験結果
 を論文の大量生産の手段にすると，策略だけによつ
 て真似が本物を追こそうと企てる類のことはないだろ
 うか？ 一般のレベルが低いとこの場合にもまたにせ
 ものと本物の見分けがつけ難いために彼らの乗ずる
 ところとなるおそれがなくはない。

しかし日本の復興はめざましい。戦後の混乱のか
 けらがまだ残っているとしても，それはじきに拭い去ら
 れるだろう。特にこの5年間に築かれはじめた日本の
 自動制御界の水準は堂々のフェアプレイにより世界に
 誇れる段階に近づける実力を蓄えつつあるように私は
 思っている。ここにもこの特集号の“stepping stone”
 としての重要な意義があると思う。

Progress of the Automatic Control

by Yasuto Takahashi

(Tokyo University)

SYNOPSIS:—Though the history of the automatic control could be traced back some 30 years, its scientific treatment was established only during the war II. In the course of the investigation of servo mechanism. It is the frequency response technique. After the war the automatic control comes into the era of competition owing to the application of this theory, the development of many modern instruments and the increase of requirement to the automatic control. The development of the automatic control is causing not only the change of instruments but the change of all the system of industrial equipments. Under this circumstances it is desirable for all people concerning in industry to understand the fundamental conception of the automatic control. In this respect our level is not inferior to that in western countries.