

技 術 資 料

鐵 鋼 業 と 自 動 制 御

高 橋 安 人**・大 島 康 次 郎*

IRON AND STEEL INDUSTRY AND AUTOMATIC CONTROL (Review)

Yasundo Takahashi and Yasujiro Ôshima

Synopsis:

Automatic control has increased its importance for rationalization of the iron and steel industry. This paper aims to give an approach to automatic control for engineers concerned in the industry.

The principal contents are as follows:

- 1) Basic concepts of automatic control,
- 2) Types of automatic controller action,
- 3) Fundamentals about how to synthesize automatic control systems,
- 4) Applications of automatic control to the iron and steel industry.

As for applications, open hearth furnaces and soaking pits are taken as examples, and the practice of temperature, pressure and fuel flow control is described.

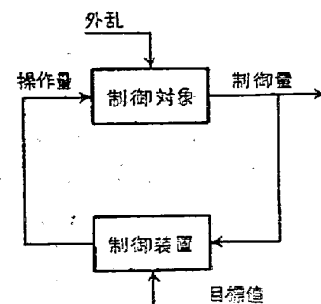
I. は し が き

工業の合理化の線に沿って、最近鉄鋼業においても自動制御の応用がさかんになつてきた。たとえば高炉、平炉、均熱炉、加熱炉等の各種の炉の操業において、その作業条件である温度、圧力、供給する燃料流量等を従来の手動調節に代つて制御装置によつて自動的に希望する値に保つよつたのである。このように人の動作を機械・装置の動作に置換えることによつて、正確さ、迅速さ、永続性等の点ではるかにすぐれた結果がえられるのである。自動制御によつて作業条件を操業上の安全限界内で最も能率のよい値に常に正確に保つことができるから、1) 製品の質が均一で良好となり、2) 作業速度が早められ、3) 燃料が節約せられ、4) プラント設備の寿命が増大する等のかずかずの利点がえられる。こゝに自動制御の経済性がある。

II. 自動制御の原理と基本概念

それでは自動制御はどのような原理に従つて行われるのであろうか。手動では操作員が計器を監視して、その指示が希望の値からはずれると、それを訂正するように、弁その他の操作を行うのであるが自動制御では制

御装置が制御しようとする量を測定して、装置に設定された希望の値と比較し、その差に応じてそれを打消すよつに動作するのである。このように制御では結果をつねに監視しつゝ、結果がたえず動作に反映するよつに行われる。この結果が原因に作用することをフィードバックという。手動においては計器指示→操作員の視覚→操作員の判断→手の動作→弁その他の動きでフィードバックが行われるのに対して自動制御においては制御装置によつてフィードバックが行われる。すなわち自動制御では制御対象と制御装置とが第1図に示すよつな閉じたループを形成している。こゝで制御対象の制御しようとする



第1図 制御系の基本的ブロック線図

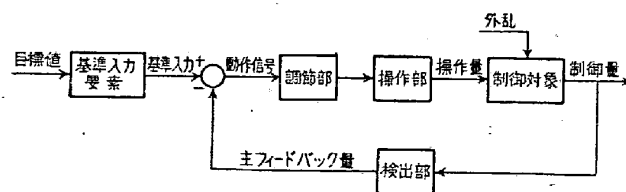
*** 東京大学生産技術研究所 第2部教授工博
* 助教授

量たとえば炉の温度、圧力等が制御量であり、制御装置が制御量を支配するために制御対象に与える量が操作量である。たとえば炉の温度制御の場合に制御装置が制御弁の開閉によつて変える燃料の流量、圧力制御の場合に煙道ダンパの開閉によつて変えるドラフトの量等がそうである。制御装置に外から与えられる希望の値が目標値であり、制御系の状態を変えようとする外的作用が外乱なのである。たとえば加熱炉の場合だと被加熱物の装入取出し、燃料ガス圧や発熱量の変化、外気温度変化等が外乱となる。

目標値の性質によつて自動制御は定値制御と追値制御に大別される。前者は目標値一定の場合、後者は変化する場合である。金属工業のように原料に物理的、化学的な処理を加えて製品としてゆく工業プロセスの自動制御すなわちプロセス制御においてはその多くが定値制御に属している。しかしたとえば炉に供給される燃料流量に対して二次空気の量を一定の比率関係をもつて制御するようないわゆる比率制御や加熱炉などで温度を予め定められた時間的変化に従つて制御するようないわゆるプログラム制御等は追値制御に属している。プロセス制御に対して制御量が機械的位置であるサーボ機構においては目標値が任意の時間的変化をなすいわゆる追従制御であることが多い。これも追値制御の一形式である。

制御系の基本的構成を第1図に示したがこゝで制御装置の内部をその構成要素にまで分割して、信号の伝わり方をしらべてみよう。制御装置の主なる構成要素は検出部、調節部、操作部である。検出部は前述の手動の場合になぞらえると計器指示と操作員の視覚に相当する部分で、こゝで制御量は測定され変位、電圧あるいは空気圧等に変換される。この変換された信号を主フィードバック量という。制御装置に与えられる目標値も主フィードバック量と同種の物理量に変換されている。この変換要素が基準入力要素、変換された信号が基準入力である。基準入力と主フィードバック量が比較され、その差が動作信号となる。動作信号が調節部によつて増巾変換されて、その出力が制御弁等のいわゆる操作部を動かし、制御対象にはたらきかける操作量を生ずるのである。調節部は手動の場合になぞらえると判断を下す操作員の頭脳からその命令によつて動作をする手足までを含んだ主要な部分に相当する。このように制御系の構成は第2図に示すような基本的ブロック線図によつてあらわすことができる。

III. 制 御 動 作



第 2 図

制御装置の動作は大別して連続動作と不連続動作に分けられる。連続動作には操作量が動作信号に比例する比例動作 (P 動作)、動作信号の積分値に比例する積分動作 (I 動作)、動作信号の微分値に比例する微分動作 (D 動作) が区別される。調節計にはこれらの動作を二つ以上加え合わせたいわゆる重合動作のものが多い。操作量を y 、動作信号を z の記号であらわすと

$$PI \text{ 動作 } y = K_P \left(z + \frac{1}{T_I} \int z dt \right)$$

$$PD \text{ 動作 } y = K_P \left(z + T_D \frac{dz}{dt} \right)$$

$$PID \text{ 動作 } y = K_P \left(z + T_D \frac{dz}{dt} + \frac{1}{T_I} \int z dt \right)$$

であらわされる。こゝに K_P : 比例感度, T_I : 積分時間, T_D : 微分時間である。

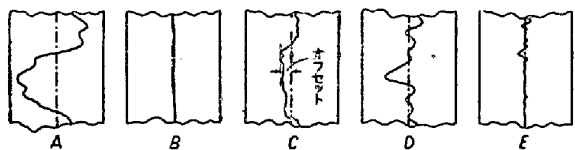
以上の連続動作に対して不連続動作には以下に述べる諸形式がある。すなわち操作量が二つの定つた値しかとらない 2 位置動作、三つ以上の定つた値のいずれかをとる多位置動作、操作量が一定速度で増減する単速度動作、操作量の変化速度が三つ以上の定まつた値のいずれかをとる多速度動作および制御動作が一定時間間隔で行われる間欠動作 (サンプリング動作ともいう) 等である。

IV. よい自動制御とは

鉄鋼関係に見られる自動制御の多くは、下にも例が示してある通り、温度とか圧力などの定値制御である。そこで簡単な加熱炉の測度制御を例にとつて、問題の所在をしらべて見よう。

この場合の操作量はたとえばガス流量であり、温度が下るとガス流量を増す。実際には空気との流量比率も制御する場合が多いが、これらは主として燃焼効率の方に関係する事項として省略し、現在の例題では熱収支の方に注目すればよい。

さて温度の記録は、まず無制御とか粗離な手動制御では第3図Aのような大きく不規則な変化を示すだろう。装入、ガス圧変化、通気変動などさまざまな要因により温度が上下するのを時折り加える手加減ではとも消せるものではない。



第3図

理想は第3図Bのように常に目標値に保つにあるが、これはどんな自動制御でも実現できない。一般に自動制御装置は偏差やその兆候が現われてはじめて動作をおこなうものだからである。自動制御すると図のC~Eのような結果になる。ここにCでは持続偏差（これをオフセットという）が現われていること、またDでは偏りの回復がおそく、そのために時々大きな偏差を生じていることが欠点と見られる——これらの偏差は製品の品質をそれだけ低下し、したがって損失に直結するから、一定の限度内におさまるようにしたい。たとえばEの程度にもつていきたい。

ここで二つの問題が生れる。その一つは第3図Eのような一点の温度の記録値と品質その他1に記した諸要求との関係如何ということ、もう一つはどうしたらEのような結果に到達するかということである。後者はつぎの節で述べることにして、ここでは前者に一言ふれておきたい。

現段階の自動制御の大部分は、制御によつて希望状況に保持しようとするプロセスを代表する量として、1点の制御量を何らかの方式によつて測る、たとえば加熱炉の炉壁の1点に抵抗温度計を装備し、これを自動調節器への入力にする場合には、抵抗温度計により測つた炉壁の1点の温度をもつてプロセス全体、特に装入鋼塊の状況を代表させているわけである。特に加熱炉などでは充分な経験や予備試験により慎重に制御量とその測定点、測定法、さらにプロセス自体（たとえば炉内の温度分布や焔の流れなど）を検討して制御計画をたてる必要がある。

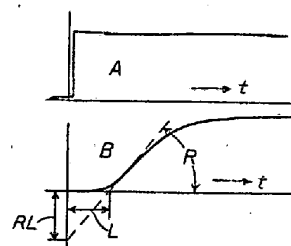
V. 自動制御の理論

制御量とそれに許される偏差の検討から、制御結果の分散が第3図Eの程度におさまればよいことがわかったとすれば、同図のC & Dの状況をいかにしてEへもつていくかがつぎの問題となる。ここに制御理論が登場する。

何ら異常がなくても第3図Cのような持続偏差を生ずるのは制御動作がP動作の場合である。熱負荷が増（減）すと燃料をより多（少）く送らねばならないが、そうするにはP動作では制御量偏差を必要とする。この

偏差がオフセットとなるのである。

I動作をつけ加えるとオフセットは除かれるが、時として第3図Dのように大きくゆつくりした振動（サイクリング）を生じ易くなる。このような発振すなわち“不安定化”の主たる原因はプロセスの“おくれ”にある。おくれというのは実にあいまいな言葉だが、加熱炉の例でいうと第4図Aのようにガス量（またはガス弁の開き）を増しても、すぐには温度がこの変化に伴わない現象（第4図のB）をいう。この現象には炉内各部の熱抵抗や熱容量の複雑極まる配列が関係しており、図示の応答曲線も立入つてしらべると決して単純なものではない。しかしこの応答形から自動制御性能に直接に関係



第4図

する因子をえらび出すと、それらは第4図の“反応速度R”と“むだ時間L”となる。これら両者は積の形RLで制御性を支配するものであり、RLが大きいほど制御性が悪い、つまり不安定化の傾向をもち、これを安定に制御しようとするとき大きな偏差を我慢しなければならない。

制御性のよい場合（圧力系など）はさして議論する必要がないから除外し、これの悪い場合を考えるとつぎの2通りになる：

(a) Rは大きくないがLが大きい、(b) Lは僅かだがRが大きい。(a)は温度制御系のような場合、(b)は液体の流量系のような場合である。前者は熱源から温度検出点までに熱抵抗と熱容量がたくさん散在しているとき、後者は流量検出系、弁の操作系などの少しづつのおくれが累積するときである。これらの制御結果を改善するには(a)に対してはD動作附加がよく、(b)に対しては“位相おくれ要素”（一つの容量と抵抗、いわゆる逆微分要素）をつけ加えるがよい。

以上のようにして制御対象の特性や外乱の性質、要求される制御結果に応じて適正な制御動作およびその“強さ”が選定されるのであるが、できれば制御対象をきめてしまつてから制御装置をつけ加えるのではなく、自動制御を前提として全体をうまく設計することが望ましい。たとえば性質のわかつた特定の外乱（炉でいうと装

入とか蓄熱室切換など)はフィードバック制御をまたないで補償 (Compensate) できる筈である。また大きな外乱原因をそれ専用のフィードバック制御により除くこと (例、燃料ガス圧力変動が著しければ予め圧力制御してからバーナに送る)、場合によつてはこれをカスケード結合 (例、ボイラ制御の1次、2次調節器) にすることも結果を非常に改善するものである。制御の利きがおそく、外乱の方が早く大きく影響するような配列は最もまずい。たとえば制御弁により支配する熱源側が蒸気管コイルで大きなおくれをもち、外乱は熱消費側に加わりしかもその部分の熱容量が小さい場合 (空気加熱器などはこれに該当) の制御温度記録は極めて大きな偏差を示すだろう。この場合に熱源の熱容量をへらし、熱消費側に充分の熱容量を与えると制御結果は見違えるほど美しくなるものである。

VI. 周波数応答計算法

上に記したような制御性に関する定量的検討を行うのに最も有力な計算手段は周波数応答法 (Frequency Response Method) である。これは制御系各部の状況が一齊に強制振動下にあると考え、各部の振動状変化の振幅、位相の關係に注目して計算を進めるものである。たとえば重油の弁をある開度 (負荷) の前後に6分の周期で正弦波状に開閉すると仮想すれば、やがて炉温度も同じ6分の周期の振動を示すだろう。このような重油弁 (“入力”) と温度 (“出力”) の両振動状変化につき、出力の入力に対する振幅比と位相差を、周期を横軸にとつてプロットすれば周期が短くなるほど振幅比が小さく、位相差が大きくなることが予想される。この分布は理論的計算、過渡応答実験、周波数応答実験、経験に基づく推定などにより求められるものである。制御回路各部の要素についてこのような“周波数応答”を求めると簡単な図上計算 (対数線図上の寸法加算) によりその制御系全体の制御特性を検査することができる。昨年12月に ASME が周波数応答講演会を開き、そのさい同学会の Dynamic System Committee がこの手法に立脚しておもな設計基準と勧告を発表したことも、この方法の重要性を物語る一つであろう。

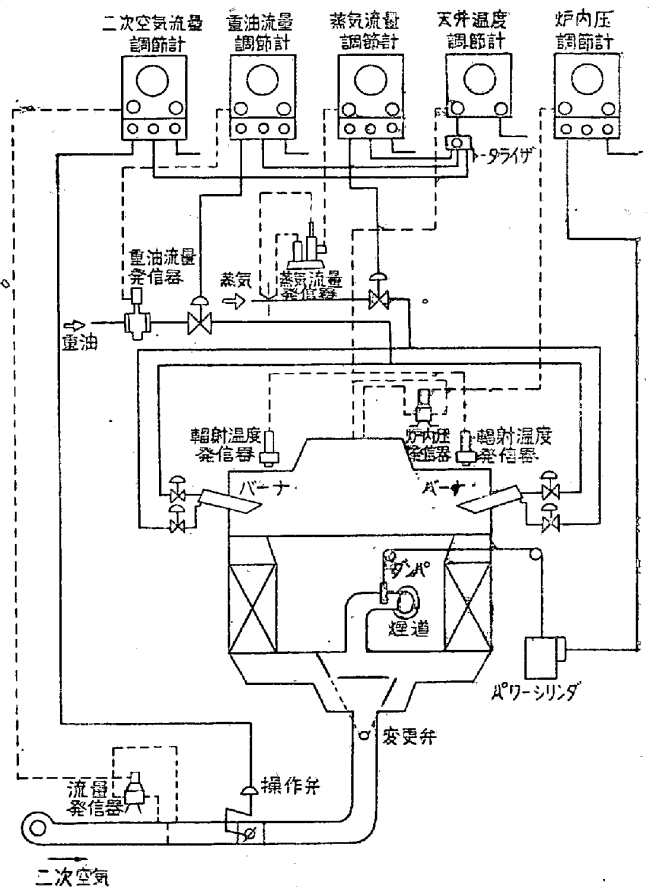
VII. 鉄鋼業における自動制御の応用例

以上自動制御の原理について述べてきたので、最後にその具体的応用例若干にふれることにしよう。鉄鋼業

- 1) 詳細は高橋安人, 自動制御計算法 (1954~6) 共立出版。

における自動制御の応用で主要なものは各種炉の燃焼制御である。ここでは平炉, 均熱炉を例にとつてその制御の実際を述べることにしよう。

(1) 平炉の自動制御: 平炉の操業で制御が実施されているのは a) 炉内圧, b) 天井温度, c) 燃料, 燃焼用空気および霧化用蒸気 (または空気) の流量ならびに流量比, d) 蓄熱室の変更等の制御である。一例として第5図に示すような方式について簡単に説明を加えることにする。



第5図 平炉の制御例

a. 炉内圧の制御: 炉内圧を適当な正圧に一定に保つと操業の能率を向上し、燃料を節約することができる。制御の方法としては炉天井内外の圧力差をベル型微圧計および発信器により検出、変換し、炉内圧調節計の出力空気圧でパワーシリンダを操作し、煙道ダンパを開閉する。

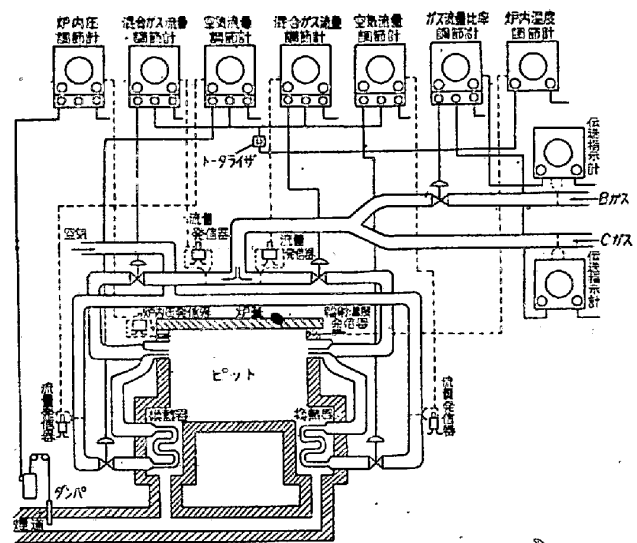
b. 天井温度制御: 平炉の操業においては炉の温度を速やかに上昇させ、安全限界内の最高の温度に保つことが、熔解量を増大し、同時に炉体の損傷を防止して炉の寿命を増すことになる。炉の温度としては一番熔損しやすい天井の温度がえらばれる。制御の方法としては輻射高温計を天井に照準してその温度を検出し、その高低に

応じて、燃料および空気の流量を調節するのである。この場合天井温度が設定点より比較的低いときは、温度制御とは無関係に燃料および空気の流量は流量調節計によって一定の値に保たれる。天井温度が設定点からのある範囲内に入ると温度調節計の出力によって流量調節計の設定点が調節され、温度制御が行われる。輻射高温計の起電力に応じた電子管式温度調節計の出力空気圧がトータライザを介して燃料および空気の流量調節計のインデクセットのペローズを作動させ、その設定点を調節するのである。

c. 燃料および空気の流量と流量比の制御：第5図の例は重油専焼の場合であるが、重油とコークス炉ガス（Cガス）の混焼の場合には重油とCガスの流量比制御がさらに必要である。重油を霧化するには蒸気または空気（一次空気）が必要であり、その混合比は燃焼状況により適当な値が定まっている。また重油燃焼に必要な空気（二次空気）の流量も理論空気量に適当な過剰空気率をかけて定められる。したがって重油流量に対して蒸気および二次空気の流量比制御が行われるのである。重油流量は面積型流量発信器により検出、変換され、重油流量調節計によるダイヤフラム弁の開閉によって制御される。また蒸気と二次空気の流量はそれぞれオリフイス型流量計および差圧発信器により検出、変換されてそれぞれの流量調節計によって制御される。前述のようにこれらの設定点はトータライザにより天井温度に応じて調節される。しかもこれらの設定点はつねに一定の比率関係を有するように調整されている。

d. 蓄熱室の変更：蓄熱室の切換えを自動的に行うには時間による切換えと蓄熱室の温度による切換えとが行われる。時間による場合はタイマにより、温度による場合は蓄熱室の温度差や最高温度を測定して、切換の指令を発生し、リレー装置により切換弁を操作するのであるが第5図にはこれらは省略してある。

(2) 均熱炉の自動制御：Top Two Way方式のいわゆる Amsler-Molton型均熱炉の全空気式制御の例を第6図に示す。燃料は高炉ガス（Bガス）とコークス炉ガス（Cガス）の混焼である。炉の各ピットは左右両側にバーナと換熱器をもっているため制御装置は重複して設けられる。制御の方法は平炉の場合とほとんど同じで炉内圧、炉内温度、ガス混合比、混合ガスと空気の流量比の制御が行われる。炉内圧は煙道ダンパの開閉によって制御される。炉内温度は輻射高温計によって検出し、混合ガス流量を調節して制御される。炉内温度が設定点に達しない加熱期には燃料および空気の流量は温度制御



第6図 均熱炉の制御例

とは無関係に一定に制御される。炉内温度が設定点に達した均熱期には温度調節計の出力空気圧によりトータライザを介して燃料および空気の流量調節計の設定点が調節され、温度制御が行われる。BガスとCガスの混合比の制御は、両方のガスの流量を測定して、Cガスの伝送指示計の出力空気圧で比率調節計のインデクセットを作動し、Bガスの流量を調節して行われる。混合ガスおよび空気の流量は左右の支管で4個の調節計によって制御される。これらの設定点はトータライザによって調節される。燃焼状況に応じて左右への配分の比率および混合ガス対空気の比率は設定機構により適当に調整される。

VIII. むすび

以上自動制御の原理と鉄鋼業におけるその実際の応用例について概説した。

鉄鋼界の自動制御を論ずるさいに思い起されるのはわが国では故寒川武君、ドイツでは Vereins Deutscher Eisenhüttenleute においてこの問題をいち早くとり上げた故 K. Rummel 博士らの活動¹⁾である。15~20年前のこれらの論文は今日では古典である。しかし今日の高度の進歩はこれら先人²⁾の礎石の上に築かれたものといえるのではなからうか。

- 1) たとえば Arch. für das Eisenhüttenw. 7 (1933/34) Heft 7, 402 頁まで4回にわたって掲載された Regler と題する論文。
- 2) 偶然にも本稿執筆中に Dr. K. Rummel の計報に接した。VDI, 96, 10 (1954-4-1) 297.