

Ⅱ．シーケンス制御技術動向の概要と教材の問題点

まずシーケンス制御の先端自動化技術の中での位置付け及びシーケンス制御の概念、構成について整理する。次に、この領域のツールに、新しい技術のインパクトが起きているが、その実体、本質は何なのかを確かめる。そして、ツールの変革や学界におけるシーケンス制御工学体系化の動向の中で、シーケンス制御システムの表現法の問題がクローズアップしてくるが、この表現法が教育・訓練の内容とに、どのように関わってくるのか、その問題を整理する。また、次章Ⅲで取り扱う、シーケンス制御システムの表現法の1つであるフローチャート方式について、教材の内容検討対象として取り上げた理由について述べる。

Ⅱ.1 自動化技術におけるシーケンス制御

——その位置付けと概念——

自動化技術は、我々の生活の極めて広い範囲で活用されているが、ここで問題とするのは産業における生産工程の自動化技術である。実際の生産工程には、種々の様式が存在していて、工程の様式は、大別して表2.1のように分類されている⁽⁷⁾。この分類は、制御原理・方式の観点からは、大きく次の2つに分けられる。1～4のフィードバック制御またはプロセス制御と、5～6のシーケンス制御とである。フィードバック制御では、流量、圧力、温度、電圧、回転数などの物理量を一定に保ったり、目標値に従って変化させたりする制御を主に取り扱うものである。これに対して、シーケンス制御では、加工、組立、搬送、取り付け、包装作業などの自動化つまり人手によらない機械化を主に取り扱っている。ただ、最近ではこの加工、組み立て、搬送などの作業領域へ産業用ロボットの導入がはかられていて、このロボットをシーケンス制御領域に含めるかどうか、必ずしも明確になってはいないようであるが、ここでのシーケンス制御は、広く生産工程全体の制御システムを取り扱うことにしておく。よって、シーケンス制御システム中に、自動化機械としてのロボットがあっても、制御方式のうえからは、このシステムはシーケンス制御システムと呼ばれることになる。

表 2.1 生産工程様式の分類

	プロセス形態	例
1. 連続プロセス		ストリップミル 製紙ミル、石油精留 メッキライン
2. バッチプロセス		酸素転炉、製鋼炉、 圧延機、鍛造工場 発酵プラント
3. 並列バッチプロセス (多数のバッチ)		製鋼工場、焼鈍
4. 発生装置		発電所、酸素工場
5. 連続組立		自動車組立工場 電気器具工場
6. バッチ組立		造船、工作工場

さて、次にシーケンス制御の概念及び制御システムの構成についてはどのようなになっているのか、これを確認しておくことにする。これらに関しては、既に電気学会シーケンス制御調査専門委員会の技術報告書⁽⁸⁾が出されていて、これが参考になるので、少し長くなるがここから引用して説明する。

まず、シーケンス制御概念については、次のシーケンス制御の定義が参考になる。

「あらかじめ定められた順序または条件に従って制御の各段階を逐次進めてゆく制御」

また、これには次の詳細なコメントが付いている。「『あらかじめ定められた』の字句は「順序」と同時に「条件」という言葉も修飾している。そのため、シーケンス制御とは、あらかじめ定められた順序に従う制御（これをプログラム制御と呼ぶ）だけでなく、あらかじめ定められた条件に従う制御（これを条件制御と呼ぶ）をいずれか一方あるいは混合した形を含むものを指すことになる」としている。そして、シーケンス制御を大別して次のようにしている。

「シーケンス制御 { プログラム制御
 { 条件制御

ここで、プログラム制御とは、カード、テープ、プラグボード、カムなどによって動作順序があらかじめ決められている制御方式である。

また、条件制御とは、あらかじめ定められた条件が満足されたときに制御を行うものであり、このときの条件はハード（回路）的あるいはソフト的に決められており、この時の内部状態と入力条件によって、次に行われる動作が選択される方式である。

しかし、シーケンス制御装置と呼ばれるものには、一般にプログラム制御かあるいは条件制御か、いずれか一方に明確に分類することは装置が大規模化するほど困難になり、両方を含む場合が多い。」

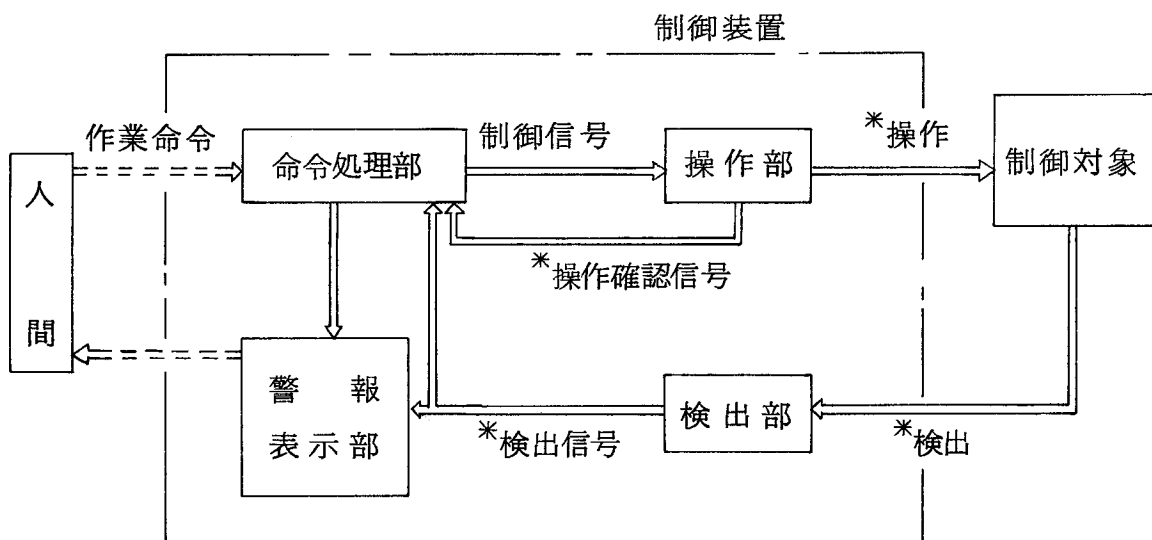
次は、シーケンス制御システムの構成について見てみよう。

「シーケンス制御系は制御対象と制御装置からなり、一般に図 2.1 のように示される。」そして、「シーケンス制御は「開ループ制御である」と

いわれることもあるが、制御対象を含めて考えると必ずしも開ループ系ばかりではない。制御装置の出力に対して応動する制御対象の挙動が明確に分っている場合には、開ループ制御によって十分目的に合う制御系が構成される。しかし、制御対象の状態を検出して、その情報を、制御信号を作り出すための命令処理にとり入れていく必要のあるシーケンス制御では、図 2.1 のような開ループ系の構成となる。」としている。

その後、昭和 57 年に、同じく電気学会のシーケンス制御工学体系調査専門委員から、「シーケンス制御の工学体系化に関する調査研究」と題する技術報告が出され、シーケンス制御系の構成図の名称を一部改訂している。なお、図 2.1 は、この委員会で改訂された新しい図である。図中の*印の名称が改訂されたものである。

図 2.1 シーケンス制御系の構成



II.2 新しい技術のインパクト

従来、シーケンス制御装置は、電磁リレーの接点と励磁コイルとの間を電線で配線をして、電気回路を構成することで実現されていた。また、一部のプログラム制御の領域では、機械式及びピンボード式のシーケンサと呼ばれる装置が使用されることもあった。シーケンサは決められた手順をセットするプログラムボードとリレー、カム等で構成されていて、一時急速に普及したものである。しかし、この装置は、各々の制御対象向に作られたもので、多様な制御対象に対応できる一般性に乏しく、その使用は限定されたものとなった。

その後、制御装置は一部半導体論理素子を用いた無接点ロジックシーケンスボードで制御回路を作り実現される時期があった。この制御装置は、無接点リレーと呼ばれ、小形、軽量で、機械的接点がないため接点の消耗による信頼性の低下がない、制御用コンピュータや電子式のセンサとのインフェースにおいても優れているなど種々の特徴を持っていた。このため、制御の信頼性向上、複雑化対応、高速処理などに貢献することとなった。また、現在でも、小形機器への組み込み用として活用されているものである。しかし、電磁リレーに代ってシーケンス制御全般への適用には至らなかった。

さて、1970年代の初頭に、これまでの半導体集積回路技術の進歩によって、マイクロコンピュータ(マイコン)が誕生している。小形で低価格のコンピュータということで、その後急速に普及したことは周知のとおりである。それまでも、ミニコンの時代からコンピュータをシーケンス制御に使用しようという試みはなされていた。しかし、コンピュータ自体が高価であったため、特別なメリットがない限り、シーケンス制御専用装置として導入されることはなかった。ところが、マイコンの出現によって、事情は変わった。シーケンス制御専用のコンピュータ導入が、経済的、技術的に十分可能な範囲に入ってきたのである。

一方、制御装置の技術進歩とあいまって、生産技術の形態の変化が現われ、自動化技術が変貌した。製品需要の多様化から、従来の大量生産に代

わって、多品種少量生産方式に移行し、生産設備の変更、拡大が頻ぱんに行われるようになる。このようなフレキシブルマニファクチャリングシステム、つまりFMSの拡大に伴い、自動制御技術へもフレキシブルな対応の要請が出てくる。シーケンス制御装置には、個々の制御対象に合わせた一品料理的性格ではなく、仕様変更や拡張に対して柔軟に対応できるものが要求されるようになってくる。

このような要求に対しては、産業用マイコンは十分満足いく機能を備えた制御装置ということができるが、その反面、生産現場のシーケンス制御装置としてみると、いくつかの難点がある。例えば、次に示すことである。⁽⁹⁾

- (1) シーケンス制御を実際に取り扱う現場の技術者、技能者はコンピュータの素養が十分でない。従来、電磁リレーシーケンス制御を扱ってきたので、その知識、技術は持っている。しかし、コンピュータに付随する難解なハードウェアやソフトウェア技術に関しては、知識、技術に乏しい。
- (2) コンピュータの取扱い及び保全に関しても、従来の技術者で対応できず、他にコンピュータ技術者が必要になる。
- (3) コンピュータは、温度、振動、ノイズ等の周囲環境に弱く、電磁リレー制御盤のように手軽に現場に設置できない。

かかる状況の中、1968年、アメリカの自動車会社General Motors社が、先に示した難点を克服できる新しい制御装置（コントローラ）の希望仕様を公表した。次に示すのがそれである。

GM社の希望仕様

- ① 新しいコントローラは容易にプログラムができ、かつ書換えも容易で、動作シーケンスが簡単に現場でも変更できること。
- ② 新しいコントローラは保守が容易で修理可能であること。できれば完全なプラグイン式を基本とすること。
- ③ ユニットはプラントの周囲環境の中でリレー制御盤より信頼性が高いこと。

- ④ 床すえ付け面積のコスト低減のためリレー制御盤より取付け寸法を小さくすること。
- ⑤ ユニットは中央データ収集システムに出力データを送出できること。
- ⑥ ユニットは現在実用されているリレー式および半導体式制御盤に比較して価格の引合うもの。

以上原則的項目に加えて付帯条件がつぎの4項目である。

- ⑦ 全入力は115V交流が適用できること。
- ⑧ 全出力は115V交流で最低2Aの通電容量があり、ソレノイドバルブ、モータ始動器およびそのまま操作できること。
- ⑨ 一般に本システムを大幅に変更することなく、基本ユニットが拡張できること。
- ⑩ 各ユニットは最低4K語まで拡張できるプログラマブルなメモリをもつこと。

これに応じて、DEC社、MODICON社等が開発を行い、初めてプログラマブルコントローラなるものが出現した。その後、我国においてもいくつかのPCが誕生し、半導体技術進歩とあいまって、技術的改善、低価格化が進み今日の爆発的普及に至る。ちなみに、この状況を日本電気制御機器工業会⁽¹⁰⁾の統計よって見てみよう。PCの市場規模は、1978年度は97億円にすぎなかったものが、1980年度は270億円と約3倍に達して、その後1982年度においては700億円と2年で2.6倍の飛躍的な伸びを示し、1985年度は1000億円の市場を形成する勢いにある(年伸び率40%)。

さて、なぜPCの活用がこのように進んだのか。これは、一言でいえば、新しい生産システムからの要請に対して、制御装置、ツールの側が適時に、適確に応えられたためであるが、PC導入のメリット、特徴をみるとその理由がわかろう。そこで、これも上に述べた工業会の調査で従来のリレー制御盤と比較して、特徴を次のように整理している。

(i) 経済性

LSI等集積化技術で、ハードウェアの小形化、モジュール化が進む。

一方でフレキシビリティ性、信頼性、保守性の機能が高まる。これによりPCハードウェアのコストパフォーマンスが高くなる。よって、十数個以上の電磁リレーで構成される制御盤では、PC活用の方が経済的になる。

(ii) フレキシビリティ性

電磁リレー制御盤の作成では、その都度配線作業を行い、多くの時間が費されていた。これに対してPCを用いた制御装置では、ハードウェアはメーカーの標準品で対応して、同一の仕様では、ソフトウェアのコピーで対応できるし、また、一部仕様が異なる場合でも、プログラムの変更が容易であるので、制御装置製作の工程が短縮できる。その他、完成後の制御内容の拡張、変更にも柔軟に対応できる。

(iii) 信頼性

電磁リレー制御盤では、リレー個数が多くなったり、塵埃、ガス等の雰囲気での使用は、接点の接触不良発生確率が高くなり、信頼性が低下する。これに対してPCでは、構成素子が半導体化、IC化されていて、信頼性が高い。運転実績でのMTBF（平均故障間隔）は、50,000時間以上となっている。

(iv) 保守の容易性

電磁リレー制御盤では、故障の原因追跡には、技術的経験を要し、作業自体も煩雑で、故障箇所の発見に相当の時間を要する。また、予防保全でも点検箇所が多く、点検作業自体も頻ぱんに行う必要がある。これに対して、PCでは、動作表示機能、異常表示機能、モニタリング機能を備える故障診断、追跡、処置等の保守作業が容易である。さらに、これらの各機能は、現場作業員でも容易に操作できるようになっている。

さて、次にこのPCというものの呼称と定義について整理しておこう。シーケンス制御用装置一般としては、シーケンスコントローラ（SC）という名称が使われ、SCはさらに機械式、ピンボード式のシーケンサとICメモリを備えたストアプログラム式（プログラム蓄積式）コントローラとに大別される。ここで用いる名称は時代のすうせいから、後者のスト

アドプログラム式である。しかし、一部フィードバック機能をも備えたものまで後者の中で扱われていることから、PCの呼称と定義⁽¹¹⁾について次のように整理する。

〔呼称〕

プログラマブルコントローラ (Programmable Controller, PC)

〔定義〕

PCとは、シーケンス制御を基本機能とし、制御アルゴリズムの実行命令を蓄積するプログラマブルなメモリを有するデジタル操作式電子制御装置をいう

II.3 シーケンス制御システムの表現

電磁リレーによるシーケンス制御装置(制御盤)を製作する手順は、概ね次のようになる。⁽¹²⁾

- (1) シーケンス制御を実現する電気回路を設計し、展開接続図を作成する。
- (2) 必要な数のリレーを制御盤に取り付け、展開接続図に従い、リレー相互の配線を行う。
- (3) 現場へ持ち込み、外部からの信号線を制御盤へ接続する。

PCによる場合は、上の(1)、(3)は電磁リレーによる場合と同じであるが、(2)が基本的に異なっていて、PCでは(2)をプログラムで実現することになる。つまり、PCによるシーケンス制御の新しい特徴とは、電磁リレー制御の場合の電線で配線を作る、ハードワイヤードに対して、プログラムで配線をする、いわゆるソフトワイヤードにあるといえる。

そして、このソフトワイヤードの特徴は次のように整理できる。⁽¹³⁾

- (1) シーケンス制御内容をいかに作るかという設計が含まれていない。

回路は既に設計された展開接続図で与えられているため、PCの側では、PCの命令語でいかに回路を表現していくかという、プログラムコーディングのレベルの問題を扱っていることになる。回路設計はPCレベルの問題ではない。

- (2) 制御論理実現のみを配慮すればよい。

マイクロコンピュータのプログラムコーディングレベルでは、各レジスタ、メモリ間の命令、データの動きなど、コンピュータをどのように動かすかの技術が要求される。しかし、PCでは、PC内部の動きには気を遣うことなく、シーケンス制御論理の実現のみに気を配ればよいという特徴を持つ。また、入出力機器との特別なインタフェース技術は必要なく、標準的に準備されている入出力ユニットを、必要なだけ入出力ハウジングに差し込むだけで済むようになっている。

電気回路については、リレーの接点とコイルとこれらを接続する線で表示する展開接続図が、PCにも用いられるが、一般には、接点の構成をはしご (ladder) の段のように表わすことから、これをラダー図 (図 2.2) と呼んでいる。そして、プログラム作成の原始情報をこのラダーで与える方式のPCを、ラダー方式PCと呼んでいる。また、回路を論理素子記号を用いて表わす方法があるが、この図をロジック図 (図 2.3) と呼んでいる。そして、ラダー図と同様この図を基にプログラムを作成する方式のPCをロジック方式PCと呼んでいる。1986年現在のPCプログラム方式では、上述した2つの方式が市場の大半を占め、しかもラダー方式が主流になっている。

さて、この電気回路をベースにしたラダー方式PCのプログラミングについて考えてみよう。回路図は既に与えられていて、プログラミングについて特別な教育は必要としないように、PC自体にくふうが施されていることからすれば、PCのプログラミングとは、回路図を機械的にPCのプログラミングコードに移し変えるだけの単純作業ということになる。しかし、実際にはそうではない問題が起きる。前回 (1985年)、われわれはこの問題を取り上げて、「ラダー方式PCのプログラミングに関する問題」⁽⁵⁾と題して、発表した。この中で、プログラミング作業が正しく行えるために理解しておくべき要件とは何か、またプログラミング学習上及び学習教材を構想する上で、基礎的的要件は何かについて、実際のコーディング作業の分析から、これら要件を探ろうとした。

その結論と裏付けとなる分析事例の詳細については、前回のわれわれ

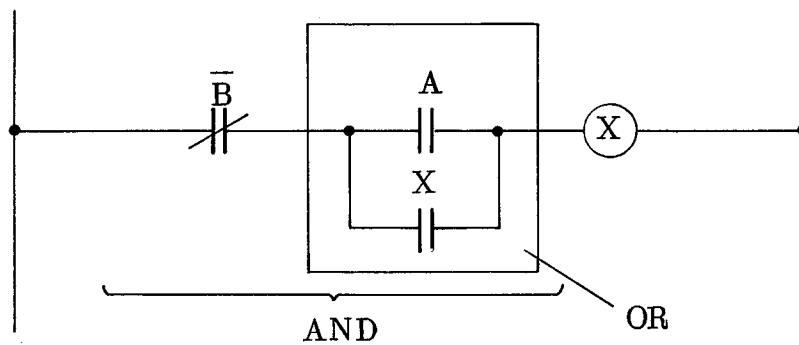


図 2.2 ラダー図

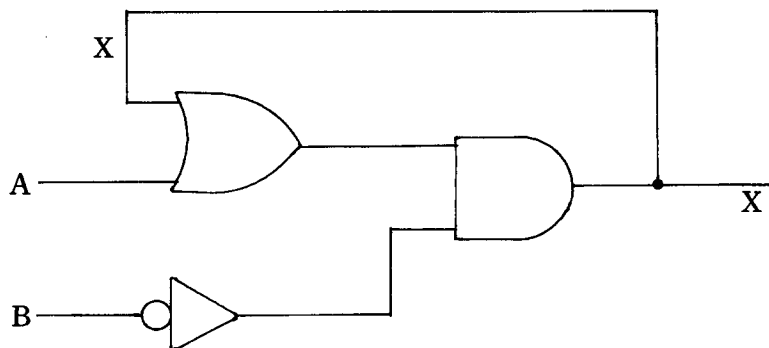


図 2.3 ロジック図

の報告書に譲るとして、ここでは簡単に結論を述べると、プログラミング理解要件として次の2点が求められていることがわかった。⁽¹⁴⁾

- ① シーケンス制御論理及びこれを実現するアルゴリズムとプログラム命令の理解。
- ② PC内部基本構成（アーキテクチャー）の内、スタックレジスタの活用及びプログラムの逐次実行方式による制約の理解。

理解要件の①は、PCにシーケンス制御論理を実現させるため、つまり作業の成否にかかわるもので、基礎的要件である。

一方②は、プログラミング作業を正しく行うための規則の根拠、理由に当たるものである。

ところで、新しいツールとして出現したPCであるが、その大半はプログラムの原始情報を依然として電磁リレーのための表現形式の展開接続図（ラダー図）から取っている。しかし、コンピュータ応用装置とし

ての性能を考えると、これら電気回路をベースにすることは必ずしも適切ではない。確かに、ラダー図は電磁リレーシーケンス時代から慣れ親まれてきた経緯があり、シーケンス制御現場では定着した表現となっているし、いくつかの特長も備えている。ところが、回路図とPCのもつ内部基本構成とは、本質的に異なったものである。このため、PCがコンピュータとしての本来の性能を十分発揮できてない面もいくつか現われている。また、一方ツールを超越して、一般にシーケンス制御システムの挙動をどのように表現すればよいかということからしても、検討の与地のあるところである。現に技術的に種々の表現についての試みがなされているところである。⁽¹⁵⁾新しい表現法の特徴は、制御の各段階の移りかわりに着目して、信号とシステムの挙動とのつながりで表現していくもので、つぎに示す方式が提案されている。

- ・フローチャート方式
- ・行程歩進方式
- ・ステージ方式
- ・ペトリネット(PETRINET)
- ・グラフセ(GRAFSET)
- ・マークフローグラフ(MFG)

これら提案の内、いくつかは既にPCのプログラム方式として採用され、製品として市場に出されているものがある。

さて、新しい表現法に対するシーケンス制御現場からの反応だが、PCに関しては市場占有数の少ない現在では、十分なデータがない。1985年5月に、神奈川県内の自動化機械製造及び自動車用板バネ製造の中小企業での導入があったので、その一部について聞き取り調査を行った。これによると、次のような反応であった。

簡単な自動化装置の設計・製作を行っているが、企業の規模が中小であることから、電気専門の技術者がいなく、機械技術者が制御システムの機能設計まで担当している。このため従来のラダー方式PCのように、制御対象の動作から一たん回路図を作り、さらにそれをPCのプログラ

ミングコードに変換するのではなく、制御対象の動作そのものを直接P Cのプログラムに表現できる方式を採用したということであった。この方式では、シーケンス制御についての理解に電気回路の知識を必要とせず、動作そのものの理解でプログラムが作れるので、機械技術者の間で分り易いと好評であるという。

また、生産ラインの自動化装置の運転・保全の例では、電気技術者がP Cによる制御のシステム機能設計、運転、保全業務を担当しているが、この新方式は、若年の技術者には比較的受け入れられ易いということであった。ただ、一部の年配の技術者は、従来のラダー方式を支持するものがあり、新しい表現法にはなじみにくい面があるということであった。

一方、教育訓練の状況についての十分な資料がない。1984年3月⁽¹⁶⁾に大阪府にある関西技能開発センターで、新方式P Cの訓練状況の聞き取り調査を行ったものであるが、以下のような状況である。新方式P Cの講座を開設すれば、定員を大幅に越える応募者があるという。この受講者は、在職労働者で、企業で自動化装置のシーケンス制御システムの簡単な設計、改造、運転、保全を主に担当している者が中心である。受講者の訓練内容に対する反応は、「この新しい方式のP Cを採用したい」「既に採用しているが使い易いので、(制御システムの機能)設計法について学びたい」等である。また、P Cメーカーによる新方式P Cの講習会も、2社の状況を調べたが、2社とも定員を上回る受講者が応募している。⁽¹⁷⁾

以上、シーケンス制御システム表現法に関する技術動向、生産現場での導入状況と反応及び教育訓練の状況からわかるように、有効な表現法に対する期待は大きい。また、このことは、今後の公共訓練におけるカリキュラム及び教材の内容(スコープ)選定に大きく関わってくることもある。

さらに、技術の変革・進展過程にあるシーケンス制御技術の教育・訓練、とりわけ訓練用教材を問題にすると、産業界に存在している製品・装置から独立しては考えられないということがある。そのため、ここ

では進展過程にある技術の1つを選定しなければならない。そこでこの選定に関しては、次の基準で行なった。

第1は、製品として市場にあり、比較的市場占有率の高いもの。

第2は、技術的、教育的検討に耐える等教育・訓練用教材対象として適当なもの。

その結果、フローチャート方式PCを当面教材検討の対象とすることにした。

なお、当然のことではあるが、このフローチャート方式は、あくまでも教材検討の対象として選定したもので、教材開発対象としてこの方式を取り上げることではないことをつけ加えておく。