

FMS の生成と展開 (Ⅱ)

高 木 彰

はじめに

- (Ⅰ) 資本主義の技術的基礎としての工作機械
 - (A) 機械制大工業と工作機械
 - (B) ヘンリー・モーズレーの「送り台つき旋盤」
 - (C) 工作機械の発展
- (Ⅱ) トランスファーマシン……以上, 41巻6号

(Ⅲ) NC 工作機械の生成と展開

(A) 「倣い制御」から「数値制御」へ

18世紀末、モーズレーは、「スライド・レスト」付きの旋盤を発明したが、それは人間が腕に抱えて加工した工具、刃物を台に据え付けて加工するというものである。それが工作機械の成立である。刃物の運動が人間の手による直接的操作から、一つの機構による操作へと転換した点において工作機械の成立は、極めて重要な意味を持っているのである。しかもそのことは金属製の機械の製作が半熟練工によってでも可能になったという点において、従って精度の高い鉄製の機械の製作が大量的に行えるようになったことにおいて、道具の機械への転化の完成を意味するものであったのであり、機械制大工業の成立の指標でもあったのである。旋盤や中ぐり盤の操作方法が単純化し、性能が向上したことにより、円筒内面の加工精度が飛躍的に上がったのである。そのことは高精度のシリンダ加工が可能となり、それを利用した蒸気機関の製作を可能にするということでもある。それは蒸気機関が機械体系における動力機として生成したということでもある。この点から、中村静治氏は、「モーリス・アンド・フィールド商会のランベス工場」によって、初めて蒸気機関が普及し、支配的な動力手段となったのであるからして、その「建設をもって資本主義的生産様式の確立とってよいだろう」([21] 183頁)とされたのである。

「スライド・レスト」の発明を契機として、工作機械は、機械の個々の部品加工において必要とされる線、平面、円、円筒、円錐、球等の厳密な幾何学的な形状の機械による生産を可能にしたのであり、それ故、機械を作る機械、工作機械の生成は、機械制大工業を一つの強力な生産様式として確立せしめる物的基盤の生成でもあったのである。20世紀初頭、大量生産体制の展開を契機として工作機械も急速に発展するが、それには二つの系列がある。一つは、その機構的改良、工具の開発、治具の発明によって互換式生産方法が可能となり、それに自動搬送装置が付け加わ

ることによってトランスファーマシンへと成長していく流れである。トランスファーマシンは、工作機械のもつ汎用性と柔軟性を犠牲にして、機能の単能化による自動化を推進したものであり、少品種の大量生産に対して適格的であったのである¹⁾。

もう一つは、従来の旋盤、フライス盤、中ぐり盤、シェーバー等の工作機械が機構的に改良されて、単体として自動化され、「自動工作機械」へと成長していく流れである。この「自動工作機械」は、「一つの工作機械に色々な加工機構を取り付けて、それが部品の設計図の順序通りに次々と動き、かなり複雑な形の製品を自動的に生産できる」(〔5〕118頁)というものである。この第二の成長系列における治具操作の自動化の方式の発展を土台として、しかし、その流れからの飛躍としてオートメーションの展開を可能ならしめる数値制御の方式が成立してくるのである。

20世紀中頃になってからの工作機械における新たな発展は、制御機構において生じた新たな展開によるものであった。それは、メカニクスの改良という従来の工作機械の発展の延長上においてではなく、それとは全く異なる発展形態を採るところのNC装置の発明であったのである。従来の工作機械の発展傾向は、汎用機から専用機へと向かうものであったが、NC装置による工作機械の操作は、その傾向を「逆転」(〔17〕211頁)させるものであったのである。NC装置によって工作機械の制御の自動化が新たな様相を帯び、加工様式の変更が容易になったことが、それまでの工作機械の発展の単能化傾向を逆転させ、「機械の汎用性を復活させ」(同前)たのであり、そこに新しいタイプの工作機械の誕生、従ってオートメーション展開の基盤の生成を認めることができるのである。

NC装置によって治具を制御する方式は、制御機構の自動化を急速に発展させた。制御機構がNC装置に生成するまでの過程は、それほど単純であったわけではない。NC装置が成立するまでの制御方式について2段階の発展のあることが、門脇重道氏によって、次のように指摘されている。第一は、「複数の作業機構が作業進行機構で結ばれた段階」であり、「自動旋盤」がこの段階に属する。そこでは従来の「工作機械に必要な複数の運動の相互調節を行う相互調節機構」に、「作業を進めていく働きをもつ作業進行機構」が付け加えられ、そのために「円筒カム等」(〔10〕24頁)が用いられるということである。第二は、「倣い方式の段階」である。「自動旋盤」等では、「二次元的加工運動が作業機構の中で実現し、更にそれを組み合わせた加工作業も作業用具の中で可能となった」のであるが、とはいえ、それは「定常的な二次元運動」のレベルの問題であり、「三次元形状をもつものの加工は依然として作業者の手に委ね」られていたということである。これに対して、倣い制御方式においては「三次元的な加工運動」が人間の手を離れて可能になったのである。その意味では、倣い制御方式における加工運動の高度化を基礎として数値制御の方式が生成してきたものといえよう。

「自動旋盤」等において、加工運動の自動化を実現するためには、「相互調節機構、作業進行機構」が重要な役割を果しているのであるが、それは同時にその運動を二次元的加工に制限することにもなっていたのである。これに対して「倣い制御方式」では、「製品形状に対応したモデルを製作し、これをなぞらせることで、三次元的な加工運動を実現する」(〔10〕24頁)ことができたのである。複雑な三次元形状をもつ加工が、機構の制御による加工運動としてではなく、モデルを導入し、それを媒介とすることによって、従って直接に作業者の手を経ずに可能になったということである。工作機械は、「倣い制御」によって「二次元的加工運動」から「三次元的加工

運動」が比較的容易になる段階へと発展したのであり、その意味において「倣い制御」は、「数値制御」の方式を出現せしめる媒介的契機として位置付けることができるのである。

倣い制御方式による切削の場合、あらかじめ作成されたモデルが機械に取り付けられると、バイトがそのモデル通りに動いて切削が自動的に行われる。そこでは部品の形を削り出す動作を発生させる情報を取り出すためには、モデルをなぞらせることだけが必要なのであり、モデルを取り替えれば、加工様式を容易に変更することができるのである。そこでは加工情報の発生源が、機構に組み込まれた物体ではなくなっていることが大きな特徴点である。中峯照悦氏は、モデルにおいては、「未だ柔軟な一般的適応性はない」というものの、ブルー・プリント（言語）を読み、それを手にするメカニズムの操作に変換するところの、人間の筋肉のかつ知的（言語的）な活動（操作的かつ制御的な活動）にとって代わっている」（[31] 188頁）とされ、その点において「倣い制御」方式は、「運動制御機構が独立化する萌芽」（[31] 189頁）として位置付けられるとされている。

倣い制御方式の場合、「接触子（スタイラス）」が「テンプレート（モデル）」にそって動くのであるが、その運動が油圧機構に媒介されて刃物を動かす「サーボ・シリンダー」を制御し、工具の送り運動を制御することになる。そこでは「刃物は常に接触子と同一運動をする」（[5] 120頁）ので、モデルに対応した形状の切削加工が可能になるのである。そこでの作業の特徴は、モデルをなぞることで形状情報、従って金属加工の際に必要とされる情報を取り出すことができるということにある。その取り出された情報が、作業機に伝達されることによって工具の切り込み量が決定され、工作作業が行われるのである。

しかし、倣い制御方式の場合、モデル（テンプレート）をあらかじめ作成しておくことが必要であり、そのためには一定の熟練を必要としたということ、又、モデルは、切削の輪郭ごとに取り替えなければならないのであり、そのモデルの変更自体が容易ではないという困難を残すものであったのである。しかも、モデルの摩滅や貯蔵の難点の他に、段取りの難しさや切削過程の監視に未だ機械工の熟練を必要とするという重大な難点もあったのである。そのような困難を解決するために、二つの方法が考えられた。第一は、「倣い制御」方式にエレクトロニクスを応用したものであり、1954年、イギリスにおいて製作された「電子倣いフライス盤」がそれである。それは従来の倣い機構のようにモデルとの接触を行う必要がなく、「テンプレートとスタイラスとの間に微小な隙間をつくり、この隙間の距離を一定に保つことにより、倣い運動を行う」ことができるものであり、「すさまの微小変化による電位差の変動を電子管式増幅回路により増幅し、電磁クラッチを断続して追跡を行う」（[5] 121頁）というものである。

そこではモデルから発生する形状情報が電気信号に変換され、その信号がコイルを通して電子管式制御機構をもった歯車により発電機を動かし、刃物の送り運動を起動する直流モータの回転を調整することによって工具を運動させ、加工を行うのである。しかも重要なことは、それは「電導性の銀インクを用いて図面を作製しておけば接触子がこの図面を追って、全自動的に作動して製品を作ることができる」（同前）という特性を有していたことである。「電子倣いフライス盤」の場合は、完成品と同じ形のテンプレートを前もって準備しておく必要がなく、図面を作成して置けば、それで機械加工が可能になるということである。「電子倣いフライス盤」においては、複雑な形の加工を完全に無段コントロールで行うことができるようになったために、従来の

ような倣い制御とは相違して、最早、モデルの作成が絶対的条件ではなくなっていたのである。

第二は、1949年にMITにおいてその研究が公表された「数値による制御」の方法である。それは電気的なパルス信号で機械を動かすサーボ機構をもつものであったのである。従来、ヘリコプターの回転翼を作るためには、多種類の形状ゲージを製作しておく必要があった。複雑な形状を製作するためには、ゲージで検査しながら仕上げる必要があったのである。この検査ゲージそのものの製作は、ゲージの輪郭に沿って多数の穴をあけ、その穴の繋ぎ目をやすりで削り落すという作業によって行われていたが、その仕事の能率を高めるためにJ. T. パーソンが「多数の点の群れのデータをパンチカードに打ち込んで、そのカードで機械を制御しようと考えた」([24] 3頁)のものが、その始まりであるとされている。その後、1952年に、MITは、倣いフライス盤を改造し、「立てフライス盤」を作成した。それは数値制御によって操作される機械の原型とでもいうことのできるものであり、倣い制御装置をサーボシステムに情報を与えるNC装置でおきかえたのであり、それは3軸制御を可能にしたのである。ただ、この「立てフライス盤」は、複雑な形状を切削することが目的であったために極めて巨大なものであった³⁾。

数値による制御によって工作機械を操作することについての実用化の目処がついたのは、1953年になってからである。それは電気パルスモータが歯車やねじを介してテーブルやヘッドを動かし、その動きに対応する電気変化が指示器に戻され、最初の指示電圧と比較し、補正されるというフィードバック制御の導入によるものである。次いで、1954年には制御指示用としてパンチされた紙テープを利用するボール盤が製作され、1955年には磁気テープが使用されるようになり、それによって同時に5軸の加工のできるものが製作された。その年にアメリカシンシナティ社においてもNCフライス盤が作成されている。それは、倣い制御方式におけるテンプレートから形状情報を取りだす代わりにパンチ・テープが使用されるというものである。

然るに、当初のNC装置用のテープを作成することはそれほど容易ではなかった。加工情報がテープにインプットされるためには、工作機械における加工工具の動きが設計図面から計算され、デジタル化、コード化されていることが必要であったのである。モデルから得られる情報はアナログ情報であるが、それをデジタル情報に置き換えるということである。この形状情報の数値化は、直接的には、検査ゲージの作成の必要上、多数の点の群のデータをパンチカード化することから出発したのである。それはテープにパンチされた孔の位置によって、工具のX軸、Y軸、Z軸の三方向の送りが計算され、機械に指令が発せられるというものである。その際、工作機械の主要な運動である①主軸の回転、②ワークの送り、③刃具の切り込みが夫々別の動力機で駆動されることになっており、夫々の動力機が数値制御されるのであるが、そのことによって夫々の運動が相対化され、3軸の同時的運動が可能になったのである⁴⁾。

従来の工作機械では、単一の動力機から各作業機構に動力が伝達されるようになっており、その間に速度制御の機構を介入させることによって、夫々の作業機構に必要とされる動力を得ていたのである。その際、夫々の作業機の運動を相対化させるには、かなりの熟練を必要としたのである。それ故、この作業機構が別々の動力機によって操作され、作業機構相互の速度関係や、作業機構を動かす順序等が数値によって制御されるようになれば、従来のメカニカルな機構ではなしえない複雑な運動や三次元加工の運動が制御可能になり、「三次元的な任意の相対運動」を作り出すことが可能となったのである。

かくて、自動制御の方式について、イギリスではアナログ方式の「倣い制御」の徹底化が追求されていたのである。これに対してアメリカでは従来のものとは全く発想を異にするデジタル方式が検討されたのであり、それが数値による制御方式を新たに確立することになったのである。アナログ方式の工作機械についても発展の可能性が残されていたということである。その意味では、工作機械の自動制御の方式については、1950年代の初めには、二つの方式が併存していたとすることができる。それが数値制御に一元化されていくことについて、宗像正幸氏は、一つには、「加工の精密性向上の可能性に関する技術学上の理由」によるのであるが、もう一つには、「倣い制御」方式の場合、「その導入にあたって生産現場の熟練機械工によるティーチングをまず必要とした」（[22] 295頁）ことを挙げることができる⁵⁾とされている。

アナログ方式では、「経営者層からみて、テイラー以来の管理の基本志向であった、熟練労働者からの生産の主導権の奪取、生産過程の経営者側による支配権の確立、強化になんら貢献しない」（同前）とされたということである。「倣い制御」方式においては、機械加工に際して必要とされる送り、速度、カット数、産出量の制御等、機械の制御は依然として熟練労働者の手に残っていたのである。それは、オペレーターが熟練と制御の権限を保持したままで工作機械を自動制御するやり方であったのである。これに対して、数値制御方式の場合は、「形式的には、プログラミングを生産現場から相対的に独立して行うことができ、現場の熟練労働者への依存を断ち切る」（[22] 295頁）ことが可能なのであり、その点において資本の側における利点が存在していたということである。競争の圧力と経営者のより効果的な管理手段の選択がNCに一元化された⁵⁾ということである。

更に、宗像氏は、数値制御が主要な制御方式として一般的に採用されていくのは、技術における「人的エラーと人的不確実性の排除」という命題が「生産過程に対する資本の統制を強化することによる、その労働への依存の極小化という資本の意図の技術的表現としての意味をもつ」（同前）ことと関連しているとされている。数値制御の方式が「生産過程に対する資本の統制」を強化する手段として極めて重要な意義をもつことは確かであるが、そこでは数値による運動の制御という方式のもつ普遍的性格も同時に強調されねばならないのである。

機械の運動は、本来、アナログとして表現されるものであるが、それをデジタル化することによって運動の様式の変更が容易になるということがNC化の意義である。しかも、運動条件がデジタル化されることによって、そのデータの保存、伝送が極めて容易になるのである。即ち、NC化は、その後の「情報化」と密接に関連しているものであり、そのような社会発展の傾向と関連させて、NC化を位置付ける必要があるといえよう。

(B) NC装置の技術的特性について

(1) MITの「立てフライス盤」は、自動制御の方式を「倣い制御」から「数値制御」へと転換させた点において工作機械の発展からすれば決定的な意義をもっていたのである。「数値制御」によって工作機械の運動を制御するということは、機械加工に必要とされる形状情報をアナログ量からデジタル量に変換することによって工具の移動等の運動を制御することである。工具や工作物の運動は連続的であり、その運動量はアナログとして取り出されるのであるが、そのような連続的物理量が数字を用いて離散的に、従ってデジタル的に表現されるということに、数値制御

装置が機械の操作に与えた決定的な意義が存していたのである。アナログとして表れる工具の移動量を数量的に処理することが可能になったことが、機械体系に内在していた制御機能を外的に独立させたのである。この制御機構の独立化にこそ、制御方式の転換の決定的な意義を見ることができるのである。工具に対しての制御機能が労働者の手から離れ、外化したことによって工作機械の取り扱いが簡単になり、機械加工に際して人間の手の介添えが直接的には必要とされなくなったのである。それは「道具の運動に対する人間の制御の増大」([17] 213頁)が質的に変化したということでもある。

ところで、自動機械体系の完成形態とされるトランスファーマシンは、確かに自動機械ではあるが、それは、カム機構やリンク機構を組み合わせることによって連鎖的に動くようにしたものであり、機構による結合であるために自動人形のようにあらかじめ決められた運動軌道を辿るものでしかなかったのである。運動に対する制御の自動化は、「エネルギー的結合による機構」において達成されたのであるが、しかし、それは機械の機能の制約において実現されたものでしかなかったのである。そこでは工作機械の汎用的特性を犠牲にしたうえで、機能が極端に単純化されることによって機械加工の自動化が達成されたのである。トランスファーマシンは、複合機ではあるが、単能機の結合されたものであり、従来の機械のもつ機能特性である「規則性、反復性、硬直性」を堅持していたのである。そこではスイッチが一度 ON されるならば、決められた順序で開始から終了まで作業が連続的に行われことが自動化であるとされていたのである。それは、攪乱的要因が全部初めから排除されることによってのみ成立する機械的世界観を一つの機械体系として実現したものであり、それ故に、トランスファーマシンがニュートン力学の機械体系としての完成形態として位置付けられうるのである。⁶⁾

然るに、数値による加工工程の制御が可能になり、NC 装置が完成されたことによって、機械に対しての制御範囲が飛躍的に拡大し、制御方式の変更が極めて容易になったのである。NC 技術による情報化が工作機械に柔軟性、汎用性を回復させることになったのである。とはいえ、加工中に作業状況を絶えず測定し、作業のあり方を機械自らが修正するというフィードバック制御が工作機械に導入されるのは、それより遅れてのことであり、センサーの能力が高くなってからのことである。それ故、現代オートメーションとこれまでの自動機械との決定的差異は、それが汎用制御機械としてのコンピュータを備えている点に集約されるが、それはフィードバックされた数値と目標値との誤差の修正作業を短時間で制御可能にするというコンピュータの果たす機能が、人間で言えば脳中枢に相当するものだからである。その結果、多様な制御を支配するプログラムの体系=ソフトウェアが機械体系の重要な要素として加えられることになったのである。制御機構がハードウェアとソフトウェアに分離されたことによって、従来の機械体系では人間の神経系、感覚系に依存して行われていた制御が、人間の手を離れて「一つの機構」によって行われるようになったのである。

それ故、1952年に製作された MIT の「立てフライス盤」は、道具の機械への転化に際しての、ジョン・ワイアットの紡績機 (1735年) に相当するものであるといふ。その紡績機は、動力がロバであったにせよ、糸を紡ぐ場合に「指を使わないで紡ぐ」ことを初めて可能にしたということにおいて、道具の機械への転化の決定的瞬間でもあったのである。アークライトの紡績機やジェニーの紡績機が発明されるのはそれから30年後のことである。その意味では、MIT の「立

てフライス盤」が製作されてから20年近く後になって漸く CNC 工作機械や MC（マシニングセンター）が登場し、機械加工の自動化、システム化が可能になるのと同じ関係にあるといえよう。いずれにせよ、NC 装置によって制御される「立てフライス盤」は、新たな工作機械の生誕を意味するものとして位置付けられるのである。

NC 装置とは、原理的には、数値符合で構成される数値情報で機械の動きを制御するものであり、プログラムに従ってシーケンシャルな工程を制御する装置である。NC 装置が原理としてフィードバック制御を内包しているわけではないのである。数値によってテープ等に記憶された加工条件は、熟練工によって培われた成果であり、それはシーケンス制御とフィードバック制御との統一において初めて実現されうるとい性格のものであるが、テープに記されていることは熟練労働をシーケンシャルな工程にプログラム化したものである。人間労働の制御機能は、本質的にはフィードバック制御とシーケンス制御の統一において行われるのである。NC 装置は、その人間労働の制御機能に関わる 1 部分をシーケンス制御、或はフィード・フォワード制御に置き換えたのである。当初の NC 装置による機械加工に関しては依然としてフィードバック制御に関わる機能は人間労働の手に残されたままであったのである。いわゆるオープンループ NC とされるものがそれであるが、それはパルスモータに指令パルスに相当する回転を行わせるだけであり、位置検出信号によるフィードバック補正がおこなわれないものである。

フィードバック制御に関しても人間労働が機械加工から解放されるのは、NC 装置にコンピューターが組み込まれ、位置検出が可能になり、加工結果を測定することのできるセンサーの能力が向上してからのことである。それ故、山下幸男氏が NC 工作機械の本質はシーケンス制御であるとされたことは、その限りでは間違いではない。山下氏は、汎用機械において、「これまでの機械に数値制御装置が付け加えられて、新しい方式であるメカトロニクスが成立する」（[19] 66頁）とされ、「メカトロニクスは汎用機械が転化したものであるから、そこに組み込まれているのはシーケンス制御である。確かに NC 旋盤のセミクローズド式のものにはフィードバック制御機構が内蔵されているが、これは NC 旋盤の本質には関わりのないことである」（[19] 70頁）とされるのである。しかし、そこで同時に「不十分な機械である汎用機械において、それを操作する人間の手を排除するという課題は数値制御という制御方式の成立によって果たされる」（[19] 237頁）とされるのは、首尾一貫しないものといえよう。従来の工作機械が汎用的性格のものであったのは、人間の手を排除できなかったことによるということでは確かであるが、しかし、数値制御においても、それがシーケンス制御の自動化である限りにおいて機械加工に際して人間の手を完全に排除できたわけではないのである。当初の NC 工作機械においては、人間労働に依拠しなければならないフィードバック制御の側面は依然として機械化が達成されないままで残されていたのである。

(2) 労働の機械化を発展段階的に見た場合、NC 装置の成立は、一つの飛躍を意味するものである。ブレイヴァマンは、それは「機械発達の趨勢にある種の逆転をもたらす」（[17] 211頁）のものであるとしている。機械の進化における基本的要素とは、機械の「運動を制御する仕方」（[17] 208頁）のことであるとすれば、NC 装置は、機械の制御の方式に決定的な変化をもたらしたということである。しかし、ブレイヴァマンは、その NC 装置の技術的特性の意義を必ずし

も十全に把握していたとはいえないのである。それは、ブレイヴァマンにおける機械の発達過程の捉え方と密接に関連しているのである。

ブレイヴァマンは、機械発達の過程を三つの段階において把握している。まず、機械発達の第一段階とは、「道具及び工作物が、機械自体の構造によって固定的な運動軌道を与えられる」段階のことであり、そこでは「各装置の構造に従って、道具は運動する」(17) 208~9頁)ものとされる。それは機械に内蔵されているギヤやカム等を用いて道具や工作物の運動を制御するという方式であり、そのような機械においては、「作業の順序がはじめてから機構に組み込まれ変更できないようになってきているか、或は、機械の内部の(カムやギヤ)装置を変えることによって、機械の機能を一定限度内で変化させうるにすぎない」のであり、それ故、その段階までの全ての機械の特徴は、「機械の作業のパターンが機構内部に固定化されており、外部の制御にも機械自身の作動中の諸結果にも連動していない」(17) 209~10頁)ことであるとされるのである。そこでの運動が「自動的」であるということは、「あらかじめ決定されたもの」であり、「一連の順序に従って作業をなし、基本的には、設計・製作時に定められたことしかなしえない」(17) 210頁)ということにおいてのことであるとされる。

次いで、機械の第二の発展段階を特徴付けることは、機械を制御するために必要とされる情報が、機械の「外部の情報源」,「作動している機構自体の外部」から、更に「それ自身の作業の進行」(17) 210頁)過程から引き出されるということである。そのことは、機械に対する制御が「機械の特殊化された内部構造に依存するものではな」くなるということ、従って、「機械類を特殊な製品や作業に合わせるという固定化的なやり方」を「外部の制御源から機械を誘導する」(17) 211頁)やり方に変更するということであるが、それは従来の機械の発展傾向とは全く相違することを意味するものであったのである。工作機械は、「今や制御性を失うことなく、多くの目的に適用される能力を回復する」(17) 212頁)に至ったとされるのである。しかし、ブレイヴァマンがそこに見たのは、機械の汎用性の「復活」(17) 212頁)にすぎなかったのである。ブレイヴァマンは、数値制御によって操作される旋盤は、「穿孔された用紙や磁気テープによって更に一層能率的に制御されうるし、その規模と出力に応じたどんな種類の作業にも直ちに適用可能」(同前)であるとしている。そこでは数値制御による旋盤に対しての制御の自動化が、生産工程における様式の変化の柔軟性を増大させることとしてではなく、経済的能率性の増大をもたらすものとしてのみ捉えられているのである。

更に、機械発展の新たな特徴としてブレイヴァマンが問題にしているのは、機械が「作動中にその作動結果を測定し、これらの結果を企図されている製品像と照合し、最終成果が計画に合致するように作業中ずっと継続的に調整をほどこしうる」(17) 211頁)ということである。機械が自らのアウトプットを評価することが可能になるということであるが、それは機械がフィードバック制御の機能を備えることによるのみ可能になることである。しかし、ブレイヴァマンにおいては機械加工におけるフィードバック制御の意義も、単に切削中の計算を迅速に行うこととしてのみ理解されているのである。「複雑な金属切削は切削中に計算を行っている、手間取るし又細心の注意を要する」(17) 219頁)ために、NC装置の導入によってその技術的困難の解消が図られたということである。かくて、第二段階における機械とは、機械に対する制御が機械本体から独立して、一つの制御機構として確立されたということにおいて特徴づけられるのであるが、

それは一面では、労働における実行と構想の分離を可能にし、他面では、フィードバック制御機能を備えるということである。レイヴァマンにおいては、機械システムから制御機構が分離することによって生じる技術的原理の変換のもたらされることが全く問題にされていないのである。

機械発展の第三段階は、「被加工物を機械から機械へと移動させるためのシュートやコンベヤー等を設置すること」によって達成されるのであり、その最も進んだ形は「自動車産業のエンジン生産ラインで使われるトランスファーマシン」〔17〕212頁であるとされる。第三段階の機械体系としてレイヴァマンが想定しているのは、「遂には生産過程の初めから終わり迄を包摂し、それを殆ど人間の手を借りずに遂行してしまうような運動機械体系、或は単一機械」のことであり、その中で機械過程が「自動的」〔17〕212～3頁)なものになるということである。第三段階において特徴的なことは、「細心の注意と厳密性をもって計画」〔17〕252頁)された通りに機械が動くということである。そのためには「結合された機械類による生産体系を単一の・巨大な・統合された統一体として理解し、設計しなすことだけ」〔17〕212頁)が必要であるにすぎないとされるのである。いずれにしろ、レイヴァマンにおいては、機械発展の完成形態、従って又、完全な機械とは、トランスファーマシンとして把握されているのであり、問題は、そこに存在しているものといえよう。

レイヴァマンが機械発展の基本的傾向としていることは、「機械過程に対する制御」〔17〕212頁)が進歩することであり、「人間の機械統制能力」〔17〕215頁)が増大するということである。機械の発展によって、人間の能力が拡張するのであるが、それは「生産用具の適用範囲を益々拡大し、その精度を益々高めていく」ことによって、「環境に対する人間の統制が増大する」〔17〕214頁)ことを意味しているものとして理解されているのである。自然法則に対する科学の支配の増大とは、「機械と機械体系という手段によって人間が労働過程を統制していく」〔17〕213頁)ことが益々可能になるということであるが、然るに、そのことは、「機械の統制が最早それを直接に操作する者にたくされる必要がなくなる」〔17〕214頁)ということでもある。生産的労働に対する代替的効果が発生するということである。かくて、機械発展によって惹起されることとされているのは、労働過程に対する統制の増大を意味するものとしての人間の能力の拡張と直接的労働の縮減ということである。

レイヴァマンは、しかし、資本主義的生産様式においては、この「労働過程に対する人間の統制」は、その反対物に転化し、「人間に対する労働過程の統制」〔17〕213頁)になるとする。「資本主義的社会関係の中で機械が用いられる仕方」は、機械を、「『人間性』に役立つもの」としてではなく、「資本蓄積によって機械の所有権を獲得する者の手段」に転化させるのであり、それ故、「機械によって労働過程を統制するという人間の能力は、直接的生産者ではなく資本の所有者及び代理者が生産を統制するための主要な手段」に転化するということである。機械は、資本主義体制のもとでは、「労働の生産性を増大させる」と同時に、「自らの労働に対する統制権を労働者大衆から奪い取るという機能」〔17〕214頁)を有しているものとされるのである。レイヴァマンにおいては、機械の特徴は、「可能な限り、労働者がもっている統制機能を漸次排除すること」であり、「可能な限り、その機能を直接的過程の外部から管理者側が統制する装置に移しかえること」〔17〕235頁)であるとされているのである。それ故、レイヴァマンの見た機械発展の帰結とは、「労働者大衆の間には、ただ無知と無能と、それ故又機械に服従する適性だ

けが広まる」ということであるとするのである。機械の急速な発展によって惹起されることは、「労働人口の大部分にとっては、自由ではなく隷属の原因、支配ではなく無力の原因、労働の地平拡張の原因ではなく、労働者を奴隷的苦役の袋小路—そこでは機械が科学の具体化として現れ、労働者は無或は無に近いものとして現れる—に閉込めてしまう原因」([17] 215頁)が増大するというに他ならないのである。そこには、機械のもつ進歩的側面に対する評価は全く存在せず、機械の資本主義的充用の結果のみが一面的に強調されているにすぎないのである。

かくて、ブレイヴァマンにおいては、機械の発展とその完成とは労働過程に対する統制が人間の手から完全に離れることであり、人間が直接的に関わるものがなく、あらかじめ決定された軌跡に従って機械が自動的に運動するということである。しかし、そこでは同時に、機械の発展過程が労働者における「作業の運営能力」の「劣化」([17] 253頁)を招く過程として捉えられているのである。機械化の進展が熟練機械工の労働を分解することによって、より低廉で技術水準のより低い「半熟練工」に置き換えることを可能にするのであり、それは「労働の衰退」をもたらすということである。然るに、機械の発展が労働能力の「劣化」を招くものとして捉えられるのは、そこでの機械の発展が従来の機械の完成として、機械原理のより完全な実現として捉えられていることによるものである。NC装置が従来の機械に対してサイバネティクス原理への転換を惹起するものとしては理解されていなかったのである。

ブレイヴァマンは、第二段階と第三段階における機械の発展を連続的变化におけるものとして捉えているのであるが、そのことは、機械本体から制御機構が独立し、フィードバック制御機能をもつようになることも、トランスファーマシンの完成への道標としてのみ意義付けられるということである。NC装置の技術的特性も以上のような機械発展の傾向と同一のレベルにおいて捉えられているのである。

ブレイヴァマンは、NC装置の技術的特性を「機械制御の革新」([17] 216頁)として規定している。それは労働者がかつ労働過程に対する統制機能を、資本の支配する一つの装置に移し替えることを可能にすることにおいて「革新」的であるということである。NC装置が金属切削等の機械加工の工程に導入されたのは、そこでは熟練機械工が依然として支配的であったことによるのであり、その管理上の困難を技術的に解決するために、資本の側によって「熟練労働の破壊と分解」が意図されたということである。NC装置は、「制御を実作業から分離する技術的可能性」([17] 252頁)を与えるものであるが故に、資本は、熟練技能労働者から職場の管理を奪い取ることが可能となるということである。

ブレイヴァマンは、NC装置の技術的意義は、二つあるとする。第一は、「工具は三次元体のどのような点へも誘導されうる」([17] 217頁)ということである。それによって加工工程様式の変更が容易になったのであり、機械加工の柔軟性が付与されることを意味するものである。第二は、機械工程についての制御が機械本体とは別のユニットによって行われるということである。その際、制御機構に与えらえる情報源は、二つある。一つは、「外部ソース」からのもので、数値の形で指令をうける。もう一つは、「工具と工作物との接触点で進行中の工程をチェックするモニター装置」からのもので、信号の形で指令を受ける。それ故、NC工作機械とは、これらの情報によって制御ユニットから信号が発せられ、その信号が工作物・工具・冷却剤等を制御する動力伝導装置を起動させるものことであるとされる。

ブレイヴァマンは、これらの技術的特性の故に、NC装置の導入は、人間の能力の拡大と直接的労働の縮減という二つの効果を実現するものであるとするのである。人間の能力の拡大効果は、複雑な金属切削が「比較的容易にコード化され、確実に仕上げられうる」（[17] 219頁）ということ、即ち、工程作業の反復性と正確性が増大するという点において見る事ができるということである。それ故、制御技術の革新の基礎にあるのは、「作業の确实性とモジュール交換による修理の容易さ」（[17] 218頁）であるとされる。どんな作業もコード化され、機械作業から分離されれば、よりはやく完了することが可能になるのであり、更に一度コード化されると、作業を再び分析する必要はなく、そのテープはファイルに保存され、同じ製品を再びつくる必要が生じた場合にはいつでも利用されうるのである。

直接的労働の縮減効果は、熟練機械工が半熟練機械工に転化することに見出される。数値制御によって生産工程が個々の半熟練労働者の間に分割されるならば、熟練機械工は、「3種類（パート・プログラマー、パンチャー、マシン・オペレータ）の半熟練労働者」（[17] 221頁）にとって替えられ、しかもこれらの半熟練労働者は、「有能な熟練機械工と比較すれば、訓練・能力・時間当たり労働コストが遥かに少なくて済む」（同前）というコスト削減効果をも伴うものである。NC装置の導入によって旧来の熟練機械工がもっていた経験と知識は、工程のプログラム化を通じて管理者側へ移行させることが可能となり、熟練機械工が本来もっていた機能は、3種の半熟練工に分割されるとするのである。

ブレイヴァマンは、NC装置は、機械から「構想と計測を分離」することによって、生産の大幅な自動化、それ故、従来の機械化を進展させると同時に、「熟練労働」を破壊し、「熟練機械工」を「半熟練工」に代替させるものとして機能するとしている。そこで前提にされていることは、第一に、数値制御においては、一度プログラムが完成すれば、運動は自動的に進行し、運動過程、加工工程においては従来の「熟練機械工」の経験とか知識とかは、最早、必要ではないとされているということである。しかし、それは同時に、生産工程において進行中の状況が全て数量的に把握が可能であることを前提にするということでもある。第二に、生産上のあらゆる熟練知識、情報が管理者側に掌握されるということは、必然的に労働者側の熟練の喪失、不熟練化を伴うものとされているということである。即ち、人間の労働力は、その「知的な合目的な性質」の故に、「あらゆる実践的な目的にとって無限の可能性を秘めている」（[17] 60頁）のであるが、その労働力の可能性を単純な執行能力に限定するという点である。

NC装置は、それ自体としては、機械システムの構成要素である加工・伝導・制御の完全な分離を可能にしたのであるが、それが更にフィードバック制御機能を備えることによって、機械に対する制御原理に転換が惹起されたのである。制御原理が機械原理からサイバネティクス原理へと転換するという点である。制御の数値化によって機械構造、特に「工具作動部分の構造の一定の範囲内での3次元にわたる柔軟化」（[22] 290頁）が達成され、その柔軟化された工具作動部分の運動は、機械構造から相対的に独立した制御系によって制御されるのである。そこでは工具の運動パターンは単一のものに限定される必要はなく、「機械系の外部からのシグナル」（同前）によって機械機能の転換が可能となるのである。従来の機械原理は、「機械の制御機構と運動機構の同一化」（[22] 290頁）という前提のもとで、理念的にはエラーの存在を認めず、従って現実にはできるかぎり機械運動からエラーを排除しようとしてきたのである。これに対して、

NC 装置においては、「サイパネティクス原理に基づき、機械運動にいわばエラーを積極的に導入し、エラーの存在を認めた上で、エラーの修正作業を通して機械の運動を制御しようとする」(同前)のであり、このエラーの修正による運動の制御ということこそ、従来の機械原理との決定的な相違点なのである。

かくて、NC 化の意義は、機械に対する制御方式そのものが変化し、制御が機械体系から分離独立して一つの機構として成立するというところにあるといえよう。それは結果としては、機械の制御が人間の手から離れるということと、機械機能の弾力性を増加させることをもたらしたのである。NC 化とは、「製造・加工プロセスの徹底分析(分解)・把握とその数学的・数式的表現、及びその制御情報、制御プログラムとしての定式化」([22] 291頁)を意味しているのである。宗像正幸氏は、NC 化の積極的意義は、ME 化と結合することによって生じるのであるが、それは次のようなものであるとされている。「①制御情報の大量高速処理による機械制御の質の向上と容易化、②制御情報の同質化による異種制御の統合・連続化の容易性、③制御情報の貯蔵・記憶能力の飛躍的増大の可能性とその加工、転換、移転、伝達の容易性」([22] 291頁)。換言すれば、情報の本質的規定の具体化ということである。他方、その短所は、アナログ方式に対して、「プロセスの基本要素までの分解とその合成、即ち、そのプログラミングの本来的困難性」(同前)にあるとされる。

(C) NC 工作機械の構造的特徴

NC 工作機械とは、機械加工に関わる主軸の回転、送り、切り込みといった運動の起動、停止が指令テープで制御される工作機械のことであり、それによって金属加工の自動化と加工様式の変換の容易性が実現したのである。NC 工作機械の構造は、NC 装置、サーボ機構、工作機械本体という三つの契機によって構成されている。このうち工作機械本体は、従来の工作機械と比しても速度変換、送り等についてそれほどの相違はない。即ち、NC 工作機械といえども機器によって保持されたワークが回転し、これに刃物が接近してワークに加工を施すという工作機械の作業の基本原理に変化がないということである。それが従来の工作機械と相違するのは、ワークと刃物の関係の制御が ME 制御装置によって行われることにある。人間による制御の場合は、2 軸以上の制御は高度の熟練を必要とするのであるが、NC 装置の場合には、三次元曲面の自動的切削も 3 軸制御のプログラム化によって可能になったのである。機械を指令通りに動作させるには、サーボモータとボールネジが用いられる。NC から発せられた指令によってサーボモータを回転させ、ボールネジを使って対象とする部品を加工するのである。

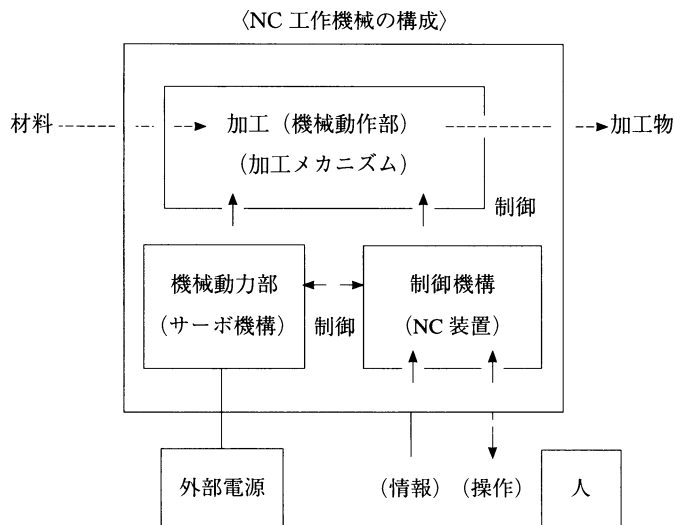
NC 装置は、工作機械本体とサーボ機構に対して制御指令を与える装置である。それは入力された数値データに基づいて、デジタル電子回路で電気的パルスを発生させ、そのパルスに応じて機械や設備の可動部を制御するのである。サーボ・モータの制御方式には、指令値だけで制御するオープン・ループ方式と、検出装置(センサー)を備え、そこから得られる検出値をフィードバックして指令の目標値と比較しながら制御を行うクローズド・ループ方式の二つがある。指令パルス 1 個に対し、正しい回転角が得られるようなモータをサーボ機構に使っている場合には、あえて機械の動きからフィードバック信号をとる必要がないので、オープン・ループ方式が採用される。ここでは、検出装置やフィードバック回路が必要ではないので構造は簡単であるが、サ

ーボ・モータの精度は、パルスモータの回転精度、変速機及びボールネジの精度等、駆動系の精度に直接影響されることになる。これに対して、作業に一定程度の精度が要求される場合には、誤差の修正により高精度の位置決めが可能なクローズド・ループ方式が採用されている。それ故、オープン・ループ方式においてはシーケンス制御が主体であり、クローズド・ループ方式においてはフィードバック制御が主要な役割を演じることになる。この二つの方式は並存しているが、発展段階から言えば、最初の NC は、オープン・ループ方式であり、次いで、センサー機器の装備によって誤差の修正が可能となり、クローズド・ループ方式へと発展したのである。

NC 装置は、基本的には入力部、情報処理部（演算制御部）、サーボモータ制御部によって構成されている。入力部は、加工情報を磁気デスク、紙テープやカードなどから読み取る部分である。NC 装置の諸機能の開始、停止や諸設定値の入力等を手で操作するための部分で、CRT（ブラウン管）とキーボードの組み合わせから構成される。演算制御部は、テープリーダー、記憶回路、データ分配回路、補間回路等から構成され、入力情報に基づいて機械の移動量や移動速度等に関する演算を行い、その結果をパルス列として発生させる部分である。サーボ制御部は、演算制御で得られたパルス列に従って、テーブル、工具台等の位置や移動速度を制御し、更に工具や加工物の回転数を制御する部分である。このサーボ制御部とサーボ駆動部の両者を含めて一般にサーボ機構と呼ばれる。

NC テープには、工作物に対する刃物の移動量、移動方向（又は刃物に対する工作物の移動量、移動の方向）、送り速度、主軸起動の ON、OFF、クーラント（切削油の供給）の ON、OFF、更には刃物の自動着脱等、加工に関する必要な全ての情報が、コード化されて入力されている。それらが工作機械の各軸の運動を制御する制御指令に変換されるのである。

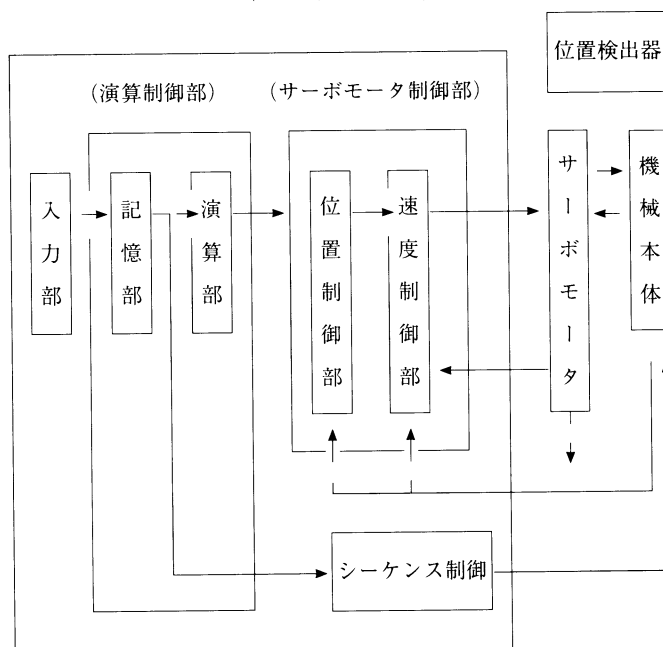
制御指令には次のようなものがある。①加工の準備機能（G 機能：NC 装置がもっている機能の選択を行うもので、ねじ切り機能や数値制御できる機械の軸の選択等がある）。②移動距離。③送り速度（F 機能：工作物に対しての工具の相対速度を指定する）。④主軸回転数（S 機能：主軸の回転速度を指示する）。⑤工具指定機能（T 機能：工具交換における工具を指示する）。⑥補助機能（M 機能：機械の機能の選択を行うもので、材料の締め付け、主軸の回転等の開閉動作を指示する）。これらの内、G 機能は



NC装置の機能そのものを支配するものである。又、このNCテープに入力された情報は、かつては機械工が蓄積された知識や技能としてもっていたものである。

工具の制御方式には、位置決め制御、直線切削制御、輪郭切削制御の3種類がある。ボール盤や中ぐり盤で穴あけ加工を行う動作には、ドリルやボーリングバーを加工位置に、正しく、速やかに、位置決めする動作と切削動作が必要である。その際、工具を加工目的地まで直線的に移動させることが位置決め制御である。これに対して、直線切削制御は、軸に平行な切削送りだけを対象とした制御方式である。ここでは移動途中で切削が行われるので、切削条件に従って、送りの速さのコントロールを行う必要がある。又、フライス盤でカムの輪郭を削ったり、旋盤で丸物の輪郭を削る場合には、従って、局面の切削に際しては、工具の通路が工作物の輪郭に沿うように、又、工具の進行方向における送り速度が常に指定された速度になるように、テーブル、サドルやバイトの動きを、コントロールしなければならない。それが輪郭切削制御である。その場合には、移動量と移動速度との両方を同時にコントロールすることが必要である。更に又、作業中の切削抵抗、モータの負荷などを自動的に検出し、送りの速度を変える等して、いつも適切な作業を行えるように制御する方式が取り入れられている。それが適応制御方式である。

〈NC装置部の構成〉



サーボ機構とは、一般的には小さな入力によって大きな出力を産出する装置のことであり、運動に対する制御機構である。JISの定義では、「物体の位置、方向、姿勢等を制御量とし、目標値の任意の変化に追従するように構成された制御系」のことである。NCの実現を可能にしたのもある意味ではサーボ機構の発展によるのである。パルス信号でサーボ機構が駆動されるデジタル・サーボの導入がそれである。草間俊夫氏は、現代のサーボ機構は、「本来の機械の限界を克服して微細な動きと位置決めを実現」しているものであり、「メカニズム（諸機素間の相対的・拘束運動）を内部に含んでいるが、本質的に本来の機械のメカニズムとは違う」とされる。そこで

は「運動における秩序即ち運動の方向・様式・量が情報＝信号として与えられ、それが増幅されて機械的運動に変換される」ことになっているのであり、「メカニズムは、従属的要素にすぎない」（[30] 316頁）くなっているということである。

NC 工作機械の場合には、NC 装置からパルス信号として発せられる情報によって駆動モーターの起動、停止、回転速度が調整され、それによって、テーブルが所定の位置に移動させられるのである。この NC 装置とサーボ機構によって加工物の位置制御と加工条件の制御が行われるのである。

ところで、コンピューター化された NC 装置では、コード化された作業情報が、コンピューターによって処理され、パルス列に変換されてサーボ機構に送られることになっている。そこで作業情報は、直接に動力を制御して、人間の直接的介入なしに、合目的運動を工具に与えている。その場合、作業システムにおける労働者の脳と神経系統、手の働きが、夫々コンピューター、パルス列の流れ、サーボ機構に置き換えられているのである。視覚から入った情報を、脳が判断処理し、神経系統を通じて手の筋肉を動かし手先に適切な運動をおこさせるという人間の内在的な制御機能が技術として外化したものが NC 装置とサーボ機構なのである。NC 装置が脳に対応し、サーボ機構が手に対応するのである。

(D) NC 工作機械の展開

N. H. クックは、従来の汎用工作機械（旋盤、フライス盤、ボール盤等）を操作するに際して、操作員が遂行しなければならない機能は、次の七つであるとしている。「①適当な素材（ワークピース）を機械に移す、②素材を機械に装着し、しっかりと正確に取り付ける、③適当な工具を選んで機械に取り付ける、④機械の速度その他の条件を決め設定する、⑤工具が要求された機能を果たすことができるように機械の動きを制御する、⑥その機械のなしうる全ての動作が完了するまでの間、種々の工具の操作や設定条件や機械の動作を順序づける、⑦部品を機械から取り外す」（[29] 30頁）。

最初の頃の NC 工作機械においては、機能の⑤「機械の動きの制御」が操作員の手から離れて、穿孔テープに蓄えられた情報を使って自動的に行えるようになっただけであり、機械加工についての作業量について決定的な減少が生じたわけではない。NC 装置の改良は、④、⑥の機能を順次プログラム化することであった。穿孔テープへの情報蓄積を、磁気ディスクやコンピューター・メモリーへの情報蓄積に置き換えることであり、それが CNC である。次の主要な開発は自動工具交換（ATC）システムの導入であった。これは機能③の仕事から操作員を解放することとなったのである。次いで、工具と素材の着脱である②、⑦の機能の自動化も可能になった。それがマシニングセンターである。又、①の搬送も無人搬送車が導入されることによって自動化が達成されることになったのである。更に、1 群の機械を単一のコンピューターの管理下に置くことが構想された。それが DNC である。

次に、CNC, DNC, マシニングセンター、更には、メカトロニクスの本格的な登場とされる産業ロボットについて見ておこう。

(1) CNC 工作機械

NC装置内のデータ演算処理部をコンピューター(主としてマイクロプロセッサ)化したものが、CNC(コンピューター数値制御)である。CNC装置は、NC装置の遂行する機能をマイクロプロセッサに置換したのである。従来のNC装置にハードウェアとして組み込まれていた機能を、ソフトウェア・プログラムによって変更できるようにしたために、各種の機能に対応することができ、柔軟な制御が可能になったのである。それによって工作機械は、機能範囲を拡張し、汎用性のあるものへと展開したのである。CNC工作機械こそは、メカニクスとエレクトロニクスの統合を実現したのであり、それによって分散制御が可能となり、複数の機械を単一のコンピューターのもとに自動管理するシステムを形成することが可能となったのである。

CNCは、マクロプログラミング機能、対話型プログラミング機能、工具通路の3次元表示機能、拡張入力言語の使用等の機能をもつので、演算処理速度を高め、加工速度の高速化と加工精度の向上(同時4軸制御CNC装置等)が可能になり、更に上位コンピューターとの情報交換が可能になったのである。又、大容量のデータメモリが用意できるようになったため、長時間のテープレース運動が可能になり、しかも多種類のワークの加工プログラムを準備することができる。それ故、CNCは、単に1台のNC工作機械というよりは、「多くの周辺機器を設けた自動加工システムの制御に適した」([47] I・67頁)ものであるとされる。

CNCへの入力、NC言語を用いて作成したNCテープによって行われるのであるが、このNCテープの作成自体をCNC内部の情報処理機能で対話的に実現しようとするのが対話型CNCである。そこでは作業者がNC操作盤内部のCRT画面をみながら日常言語を用いてNCデータを作るのである。対話型のCNC装置は、従来のプログラミング作業の簡素化をもたらしたのである。

CNC工作機械の加工は、コンピューターに入力した切削条件等のデータベースで機能するシステム化された方式である。従ってCNC工作機械を使用するためには、あらかじめデータベースを構築しておくことが必要であり、データベースの内容がそのまま使用技術に反映するため、最適な切削工具の選択や加工条件等の設定が重要なポイントになる。切削加工は、工具の切れ刃で被削材から不必要な部分を削り取って、所定の形状と寸法を得ることであるが、その場合の切削条件とは、切削速度、送り速度、切り込み量のことである。それ故、合理的な切削加工技術を実現するためには、プログラミングの内容を充実させ、切削工具とその使用技術についての知識を追求することが必要とされるのである。CNC工作機械を稼働させるために必要なツーリングシステムとは、ツールと保持具の組み合わせの標準化を図り、これに加工条件等のソフトを加味したものである。即ち、CNC工作機械は、それ自体で所期の効果を挙げることができるのではなく、ソフトの作成等、人間の技術的能力が依然として重要な役割を果しているのである。

NCとCNCとの相違について、小野隆生氏は、従来のNC工作機械では、「目的意識と記憶器」が「一体化」しており、「プログラムをテープに入力することによって制御を自動化したにすぎず、従って、そこでは単体導入はみられても遠隔操作によるシステムの展開は基本的に無理であ」ったのであり、これに対して、CNC工作機械は、「全体的には上位コンピューターに制御されながらも、サブルーチンな作業プログラムを自己の記憶器の中に備え、『自立的運動』を可能としている」のであり、それ故、CNCは、「システムの展開の必然性を内在した技術である」とされ、「CNC工作機械をもって完成形態と位置付け、機械との画期を設けること」([28]

106～7頁）ができるとされている。システムの展開の必然性を内包するか否かについての問題としては、確かに小野氏の指摘される通りである。しかし、そのことと機械加工における自動制御の確立が同じ問題として扱われるのは疑問である。機械加工に際して、人間の手が本質的に排除されうるということと、システムの展開の可能性とは基本的には別の問題である。

(2) DNC（ダイレクト数値制御・群管理）

1台のコンピューターに数台のNC工作機械を連結し、コンピューター側にNC指令情報を記憶させ、この指令情報を夫々の工作機械に配分して、NC工作機械を端末機として、その操作を直接的に制御しようとする方式がDNCである。或は、1台の中央コンピューターで現場にある何台かのNC工作機械を集中して制御する方式のことを言う場合がある。それは、中央のコンピューターによる統括的制御による稼働効率の向上を実現しようとしたものであり、生産管理やパートプログラムの実時間処理等の機能が持てるようになったのである。しかし、DNCは、システム構成の柔軟性に難点があるため、広範囲に利用されるには至らなかった。

(3) マシニングセンター（MC）

NC工作機械（特に、NC中ぐりフライス盤）の中に、多種類の工具を主軸に自動的に着脱する自動工具交換装置（ATC）と自動パレット交換装置（APC）を備え、更にワークと切削工具に対する計測機能を装備したものがマシニングセンターである。それによってフライス加工、穴加工という「異種の加工の複合化」が可能になったことから、マシニングセンターはNC方式による複合工作機械としての性格をもつのである。マシニングセンターは、数十本の工具（エンドミル、ドリル、中ぐり工具等）を内蔵し、その工具の取り替え等がテープによって制御される。テープにあらかじめ記憶させておいた指令に基づいて、加工に必要な工具が機械の手で自動的に取り出され、主軸の加工位置まで移動させられ、主軸に装着され、加工が行われる。一つの加工が終わると、その工具は再びもとの位置まで戻され、更に次の加工に必要な工具が自動的に取り出され、加工位置に運ばれ装着され、次の加工が行われる。マシニングセンターは、X、Y、Zの3軸とテーブル自動割り出し機構、多数の刃物を必要に応じて自動交換する機能を備えることによって、工具交換や工作物段取り替えの時間の短縮、同時多面加工による切削時間の短縮を実現したのである。

ATCは、工具の着脱交換の工程を自動化したのであるが、それによって工具段取りのための機械停滞時間を短縮し、加工工程の生産性向上を飛躍的に高めることになったのである。それは、1回の段取りで穴あけ、ねじ立て、中ぐり、面削り、溝削り等の多面加工と複合加工を長時間、連続的に行うことを可能にしたのである。又、APCは、ワークをマシニングセンターに自動供給することを可能にし、一つのパレット上のワークを加工中に、別のパレット上で次のワークの段取りができるようにしたのである。

更に、切削中の異常発生への対処が自動化された。異常の起きたワークを自動的に不良品として排出し、次の新しい素材の加工を開始できるようになった。又、工具が折損すれば、代替工具を自動的に選択して加工を続行することが可能になった。又、異常対策だけでなく、加工されたワークの精度を確保すること、つまり機械の動きを安定させ、更に変位を補正することが可能

になったのである。

軸物部品の加工に対し、施削のほか短縮の加工(エンドミル等)が可能なものが、ターニングセンター(TC)である。旋盤加工以外にもフライスや穴あけ加工の機能があり、刃物は20本のマガジンから自動交換アームで工具軸に供給される。マシニングセンターは、角物の対象を加工するのに対して、ターニングセンターは、丸物の対象を加工するのに使われ、NC旋盤の機能をより高める工作機械であり、又、ドリル加工や軸方向の溝切り等も可能である。

ところで、マシニングセンターの場合、如何に稼動時間内の切削時間、または加工量を増大させるかということが問題である。ATCの工具交換は非切削時間であり、交換時間を短縮することは、FMSの生産性の上昇に際して極めて重要なのである。しかし、ATCの交換時間を短縮すれば、機構は複雑となる。それ故、新たな展開を意図するATCについては、従来の工具を交換するのみのものではなく、工具交換機能の周辺装置としての働きを追加するものが考えられる。それにはATK(自動工具管理装置)がある。従来のMC、FMSの場合、工具寿命について、実績による統計で、ワークに対する工具寿命を割り出して予備工具をATCマガジンに収納しておき、これを順次使用する方法がとられている。そのため予備工具用にATCマガジンも大容量となるため、複式マガジンを採用する必要があるのである。ATKとは、MC稼動中でATCがストップしている時、不用となった工具を自動でマガジンよりとりだし、新しい工具を収納するサブATCとして機能するものである。ATKは、ATCの工具交換、及び次工具の選択待機の他にMC稼動中の間にも、余分の仕事をさせ、フレキシビリティと、効率アップを計り、無人化を担う周辺装置である。

(4) 産業ロボット

加工工程における産業ロボットの導入は、ハンドリングに関わる工程においてであり、部品の移動や搬送に関わるものが主である。加工物を工作機械に搬送し、自動着脱する手段として使われるのである。ロボットが加工物を把握し、位置を変換し、加工台に固定する作業を行うことはそれほど位置決め精度の高さが要求されないからである。又、組み立て工程においては、従来、溶接、塗装にロボットが利用されてきた。スポット溶接の場合は、位置決め点に到達することのみが必要であり、途中の経路は問題にならないので、それは位置決め制御に関わる工程である。又、塗装やアーク溶接の場合は、連続経路にそって作業が行われるので、所要の経路を所要の速度で動作しながら作業を行う必要があり、それは直線制御⁷⁾に関わる工程である。それらはNC化によって準備されていたのである。しかし、組み付けに際しては、ロボットに対して特別の条件が要請される。それは高い位置決め精度と三次元空間における柔軟性である。搬送や溶接のロボットでは、位置決め精度としては、0.5mm程度で充分であるが、組み立て用ロボットとしては、0.05mm以内の位置決め精度が必要とされるのである。この二つの条件が技術的障⁷⁾害とな⁷⁾って、組み付け工程へのロボット導入が遅れているのである。

産業ロボットは、基本的には、制御部、機構部、感覚部(センサー)から構成される。機構部は、本体とも呼ばれ、人間の腕に相当するマニピュレータと手に相当するロボットハンド(エンドエフェクター)からなっている。マニピュレータやハンドは、アクチュエータにより駆動される。制御部は、軌道演算を行ってアクチュエータを適切に制御するのである。制御部は、プログ

ラマブルコントローラやNC装置によって構成されており、制御部を十分に機能させるために、センサーが必要となる。センサー部は、①自分自身の稼働部がどうなっているか、②作業対象がどうなっているか、③他の機械装置や産業ロボットの周辺機器がどうなっているか、④自分自身が正常であるかどうか、という四つの状態をチェックする。この中で、センサーとアクチュエータのハードウェアの進歩が産業ロボットのシステムとしての発展可能性の鍵を握っているのである。

産業ロボットの機能には、次のものがある。作業機能（動作機能—腕、手首、手、拘束機能—指）、移動機能（足、車）、制御機能（動作制御機能、教示機能）、計測認識機能（計測機能、認識機能）。このうち動作制御機能には、動作順序を制御する機能と位置や経路をたどる運動過程と運動の速度を制御する機能の2種類がある。

産業ロボットに要求される動作機能の特徴とは、三次元空間において自由度の高い多様な動作を行うことができるということである。三次元空間中の複雑な運動と作業対象の把握・保持を行うためには、産業ロボットは、機構的には、「多自由度」でなければならないのである。「多自由度」とは、時間的柔軟性と空間的柔軟性を確保するということである。時間的柔軟性とは、時間の経過に従って要求される作業内容の変化に容易に対応しうることであり、空間的柔軟性とは、ある特定の時間内において、作業経路や移動経路の空間的変更が簡単に行われることであり、同時に、回転、屈伸上下、左右移動や振り等の運動機能にも高い自由度を有するということである。この三次元空間で、機構的に「多自由度」であることこそ、産業ロボットを規定する基本的な契機なのである。

高い位置決め精度を実現するために、視覚センサー、触覚センサー、力センサー等の感覚をもった知能ロボットが利用される。これらのセンサーからフィードバックされてくる情報によってサーボを制御する場合には、機械に内蔵された機構的な位置決めのための専用の治具が必要でなくなる。そのことは、変化に対する多様性が増加するため、位置決め精度が高くなることを意味しているのである。

産業ロボットも、NC工作機械と同様にプログラム原理によって制御されるのであるが、そのことは、一台のロボットがそれ自体の基本的構造を変更せず、主要要素を取り換えることなく、様々な作業をこなすことができるということである。ロボットハンドの取り換えと、プログラム内容の変更によって異なった作業内容を指令できるのであるが、それがロボットの「多機能性」を実現することになるのである。マイクロ・コンピューターの演算処理能力、情報処理能力の向上により、ソフトウェアによる制御方式が実現できるようになった。産業ロボットの腕の動作、指の動作、腰の動き等を制御するのは、制御装置内のマイクロ・コンピューターなのである。⁸⁾

（Ⅳ）フレキシブル生産システム

生産システムが自動化されるに際して、機械加工の工程と機械的組み立ての工程とでは全く異なる様相を呈している。従来の機械体系の完成形態とされるトランスファーマシンも、機械加工の工程の自動化を部分的に実現したものに他ならないのである。組み立て工程を一つの流れ作業化することによって大量生産体制を確立したのはフォード・システムであるが、しかし、そこで

の組み立て作業は機械を基礎として行われていたわけではなく、「細分化・単純化、標準化された手作業の規則正しい繰り返し」([36] 80頁)を基礎としていたのである。即ち、機械的組み立ての本来的な自動化がフォード・システムにおいても未だ確立してはいなかったということである。その意味では、機械的組み立ての工程の自動化と柔軟化は、産業ロボットにおける自由度の高位化が達成されたことによって漸く途に着いたところであるといえよう。

フレキシブルな生産システムを一般的にFMSというが、加工と組み立てを区別した場合、機械加工を狭義のFMSといい、機械的組み立てをFASという。FAとは、本来的にはこのFMSとFASの両者が統一されたことを指すものである。ここでは、この両者を区別して検討しておこう。⁹⁾

(A) FMS—機械加工の自動化—

NC工作機械は、それ自体としては機械加工工程の順序の自動化を達成したものである。それによって加工工程全体の自動化が実現されたわけではないのである。機械加工に際しては、加工順序以外に、工作物(ワーク)の取り付け、取り外し、その搬送、工具の交換、工具及び工作物の位置の制御、工作物の形状・寸法のチェック、加工条件の制御等の自動化が必要とされるのである。それは加工を単独の工程としてみるのではなく、一つのシステムとして理解することによって可能になるのであるが、そのようなものとして実現されたのが、柔軟生産体系=FMSである。

FMSとは、基本的には自動搬送システムと機械加工システムとが結合されたものことである。その特徴は、搬送とハンドリングにおいて自動化が達成されたということである。NC工作機械に搬送ラインを組み合わせ、これに自動監視システムを加えたものが加工セルであるが、それがFMSの出発点となったのである。FMSの能力を飛躍的に発展させたのは、マシニングセンター(MC)が作成されたことである。第二段階におけるFMSは、加工と搬送の自動化だけではなく、工具の交換や機械のトラブルを予防する機構をも備えるようになってきている。現在の主流は、この段階のものである。更に、段取り作業や組み立て作業をスマートロボットの導入によって自動化する構想があるが、それはいわば第三段階におけるものである。

MCや産業ロボットによって機械加工の順序の自動化と工具とワークの着脱の自動化とが本来的には達成されたといえよう。勿論、そのこと自体は、工作機械の操作において決定的な意義をもつのであるが、しかし、それだけで加工工程の自動化が達成されるということではない。それらMCや産業ロボット等の加工装置群を一つのシステムとして有機的に結び付けることが必要であり、それが自動化された搬送システムである。MCがフレキシブルなシステムとして機能するに際して、無人搬送車が非常に大きな役割を果たしているのである。加工工程の自動化という部分的なものではなく、個々の機器をシステムの、体系的に配置することによって生産体系の高度化を志向することこそ、FMSの目的とすることである。現実的には搬送系の能力がFMSにおける生産性上昇に対してネックとなるのであり、FMSの設置に際して搬送路のタイプ、搬送速度、無人搬送車の台数を適切に決めておくことは極めて重要なのである。それ故、FMSを自動搬送装置を中心とした生産システムとして規定することもある。¹⁰⁾

搬送とは、加工部品及びそのパレットを作業位置から次の作業位置まで移すことである。典型

的なものには台車搬送があるが、それは自動着脱機構をもつ機械の待機場所まで加工部品を運ぶ装置であり、床に埋めた導線通りに運行して、停止位置で自動着脱装置からの引き込み機構において搭載した工作物を引き渡すのである。この台車の出現により、加工部品をFMSのパレット準備場所から機械へ、又機械から機械へと自由に搬送することが可能となったのである。

FMSは、ハードの側面から見ると、①MCや産業ロボット等による自動加工機、②無人搬送車やコンベヤーによる自動搬送機、③加工対象の保管、管理を行う自動倉庫の、いわゆるハードウェアと、④これら全体を制御するコンピューターによる自動制御機の四つの契機において構成されている。この点からすれば、FMSの基本機能は、次の五つに集約されるのである。①NC工作機械群による加工機能。これは素材を製品に変形させる機能である。旋削加工、フライス加工、ドリル加工、研削加工等があり、主としてマシニングセンターやターニングセンターを中心として、NC工作機械が受け持つ。②物流を司る搬送機能。モノレール、ロボットなどで、工作物や工具を所定の保管場所と工作機械の間、又は、各工作機械間を移動させるための装置である。③保管機能。素材、仕掛品、完成品の貯蔵を無人において行う自動倉庫であるが、同時に自動倉庫は、在庫管理機能も果たすのである。④システム保全機能。システム全般を監視し、各種機能の働きを円滑にする。故障診断機能や自己修復機能のため、各種センサーが組み込まれ、保全の役割を果す。⑤ソフトウェア機能。物の流れを総合的に制御・管理する情報に関するコンピューターソフトウェアである。

FMSのソフトウェアは、ハードウェア構成の有効性を導出するためのものであり、FMSの運用の優劣は、ソフトウェアの巧拙と密接に関係しているのである。それは大別して3種類のものがある。①生産制御ソフトウェア。加工、搬送、組み立て、検査、保管等素材から製品までの生産に関わるもの全てを対象として、それらの制御命令と運用、さらには保守・保全を行うものである。このソフトは、基本的にはデータ管理、運転制御、運転モニタリング、実績管理及び状態表示の機能から成り立っている。生産制御ソフトウェアに関係するデータは、関連する技術、管理情報処理システムから送付される工具や工作物のNC加工やスケジューリングに関わるデータや生産現場から送付される機械や工具、工作物等の実績や現状に関するデータ等が含まれている。②技術情報ソフトウェア。ここでは生産プロセスに関わる3種類の設計、製品設計、生産準備である工程設計、フレキシブル生産システム設計が中心となっている。③管理情報ソフトウェア。これには生産計画、負荷計画、日程計画等の計画活動と実際の生産の進み具合が予定に対してどの程度かという進捗状況の管理、在庫管理、治具管理等の管理統制活動が含まれている。

FMSがその本来の機能を発揮するのは、それが多品種少量生産に対して柔軟に対応が可能であり、かつ生産性向上やコストの低減にもつながりうる生産システムであることによるのであり、それ故、FMSについては生産性と柔軟性を実現することが決定的な機能として要求される。生産性を上げることは、ラインの構成化と夜間無人運転の3シフト化でかなりの程度まで達成されている。これに対して柔軟性については、搬送方式と加工機の両者についてのフレキシビリティを考えなければならないのである。そのことは工作機械としては、工作物への接近が容易になることが必要であり、そのために、「X、Y、Zの各軸の移動をコラム側にもっていったコラム移動形マシニングセンター」〔52〕38頁〕が導入されることになったのである。マシニングセンターの加工軸は、通常は1本である。そこで、生産性を上げるためにヘッド交換方式が考えられた。

従来、「大部分がギャングヘッドといわれる多軸の穴あけ専用ヘッドとフライスヘッドであった」(同前)のである。それは同時に多くの加工が可能であり、生産性を増大させるが、しかし、保有するヘッドについてのみの加工であるので、フレキシビリティの面では低下が生じる。これに対応するものとして、ツールマガジン交換方式のマシニングセンターが導入された。更に、モジュール構成によるシステムバランス形の工作機械、或は異機種モジュール構成工作機械が製作された。これらは「システムの負荷変動に併せて適宜モジュールをかえて加工機能をかえる方式」(同前)であり、柔軟性を高めることになったのである。

FMSにおいて生産性の上昇と柔軟性を高めるという二つの条件を充たすものとして、最も適しているとされるのが「加工セル方式」である。小島利夫[51]氏は、「加工セル方式」について、大要次のように指摘されている。それは、加工セルと言われる機械加工の基本システムを構成単位として、必要な種類と数の加工セルを配設し、各加工セル間を無人搬送車で結んだものである。各加工セルは、柔軟性に優れたNC工作機械と産業ロボット、又はワークチェンジや故障検出のためのモニターによって構成されている。NC工作機械や産業ロボットのプログラムを変えることにより、多種類のワーク加工ができるし、無人で長時間運転できる。加工セルを増やしていくことによって、いくらでも大規模なFMSを組織し得るし、必要に応じて規模を縮小したり、一部の加工セルを入れ替えたり、全体のレイアウトを変えたりすることも容易である。加工セル方式のFMSでは、単一製品の部品加工はもとより、ロボット、ワイヤカット、マシニングセンターというような異質製品の部品加工も容易に行うことができる。セル方式は、従来のライン方式を転換させたものであるが、それは同時に加工機械における専用機型から汎用機型への転換を意味しているのである。

更に、ロボット付きの加工セルの場合、多数の加工プログラムを記憶するための大容量メモリをもったNC工作機械と、ワーク着脱のためのロボット、それに加工状態を監視して異常を検知するためのモニターの三つの構成要素からなっている。部品置き台に置かれたワークを、ロボットが1個ずつ工作機械に対してローディング、アンローディングし、無人で加工を続けることができる。更に、ロボットのハンド或は部品供給装置にセンサーを付けて部品の種類を識別することによって、複数の種類の部品を混在させて加工することができる。このときの各種の加工プログラムは、あらかじめCNCのメモリに格納されている。

従来のFMSは、特定の部品、即ち類似形状の部品を生産する目的のものが多かった。1種類の部品の加工にトランスファーマシン等の量産機械を使うのに対し、新たに試みられたことは、数種類のシャフトの類とか、類似形で寸法が異なる一連の部品を加工するというような、工場の中の特定の生産ラインをFMS化するということである。この場合、DNCによって生産管理から工作機械の制御までを集中制御する方式が採用されている。しかし、DNCシステムは、加工対象が特定の類似部品に限定されるので、加工対象の部品的変更に伴う段取り替えやラインの組み替えに対する即応性に乏しいとされている。又、加工様式の変更に対するソフトウェアの開発費や手間がかかるという経済性的問題もあるとされる。従来のFMSは、特定の生産ラインに限られているという意味において「限定FMS」([51] 54頁)であるといえよう。これに対して、加工セルを基本としたFMSは、線から面への展開を可能にした、柔軟性の高いFMSであるといえることができる。

加工セル方式のFMSの特質は、従来のFMSと対比することによって明確にすることができる。この点について、小島氏は、次のようにまとめられている。

① ボトムアップ方式であること。従来のFMSの主流のDNCは、中央部における情報を末端部に流す「トップダウン方式」の管理形態をとっているのに対して、加工セルによるFMSでは、中央で立案される生産管理計画に従って、現場の状況に応じて作業を進める現場指導形の「ボトムアップ方式」をとっていることである。この方式は、計画の部分的な変更や設備機械の故障、材料納入の遅延、不良品発生の場合の処理、特急作業の発生、試作部品の流れへの挿入等、通常の機械工場の運営に際して発生する色々な事態に対処するために重要なことである。工場全体のFMS化、即ち面のFMS化に対しては、現場主導形によらないと運用が難しいので、加工セル方式のFMSであることが特に必要とされるのである。

② 管理と制御が分離されていること。従来のFMSにおいては、中央のコンピューターにより、生産管理と設備機械の制御はいずれも集中的に行われている。これに対して、加工セルによるFMSにおいては、生産管理情報とNC工作機械の運転指令情報が分離されているのである。生産管理用コンピューターからは、素材在庫状況、仕掛け状況、工程進捗状況等の情報を随時把握できるが、夫々独立した加工セルでの加工部品の選択は、加工セルが主体性をもつものとされている。従って、加工セルを構成するシステムの運転制御は各加工セルで行うことになる。これが線のFMSから、面のFMSへの展開ということである。

③ 高度の拡張性と柔軟性が達成されていること。従来のFMSは、特定部品や類似部品の加工ラインのためのものである。このようなFMSは、加工対象の変更や設備の変更、即ち、拡張や縮小に対する対処が困難であるし、柔軟性に乏しいとされる。これに対して、加工セルによるFMSは、加工セルが互いに独立しているので、設備の段階的拡張やレイアウトの変更等が極めて容易になっているのである。

④ 規模の大小に対応して生産システムを組織することができること。加工セル方式のFMSの場合、「加工セル一つでもFMSとなり得るのである」([51] 54頁)。

(B) FAS—組み立ての自動化—

機械的組み立て工程の自動化と柔軟化を意図した生産システムが、FASである。組み立てとは、定義的に言えば、2個以上の部品を結合して製品または半製品を作る作業のことであり、その作業の基本的な要素には、供給、搬送又は移送、結合又は組み付けの三つがある。供給とは、部品をばら積みされた貯蔵場所から給送して個々の部品を分離し、向きをそろえて整列させ、組立ラインの作業場所まで装入することである。移送は、部品、製品または補助器具等を組立ラインに沿って移動させる機能であり、ここでは組立品の姿勢を適切に保持することが重要であるとされる。組み付け（この工程が本来の組み立てである）には、2個以上の部品を装入、結合し、一体化する必要があるが、そこでの基本的な動作は、次の8個である。「①軸と穴のはめ合わせ、②ねじ締め、③圧入、④挿入と回転、⑤挿入と固定、⑥軸端固定、⑦圧着、かしめ、接着、⑧溶接」([47] I・84頁)。これらの作業を自動化することが組み立て作業の自動化であるが、そのためには、「組み立てを容易にする製品設計と組み立て工程設計を並行して同時に徹底して行うこと」(同前)であるとされている。ここでの組み立て工程設計とは、製品又は半製品を構成する

部品をどのような装置, 方法, 順序で組み付ければよいかを決める作業のことである。

組立工程の自動化は, 最初, ねじ締め, はんだ付け, リベットかしめ, 溶接, 接着等の個々の工程の自動化から始まった。これらの自動化機器の開発, 導入によって, 個々の自動化からラインの自動化へと段階的にマンマシンシステムが高度化したのであり, 更に, エレクトロニクス技術の進展により, 多種少量生産への対応や無人化組立ラインへと発展したのである。この過程では, 組立ラインを従来のコンベアから部品供給兼用組立台車方式に変更した台車コンベアシステムという新しい組立システムも出現している。

台車コンベアシステムの典型的な例として, 日産自動車の九州工場(福岡県苅田町)の場合がある。従来, 自動車産業における生産システムは, FMS というよりは, FTL(柔軟生産ライン)とされるものであった。しかし, 日産の場合, 1992年に, 第2車両組み立て工場において採用された新しい生産方式は, 人, 物, 設備を情報ネットワークで最適に結び付け, 一つのラインで複数の車種を効率よく生産しようとするものであり, それを FMS と称しているのである。それによって1本の生産ラインで4車種の生産が可能になったとされている。日産では, それを IBS(インテリジェント・ボディアッセンブリー・システム)としている。それは内容としては, ここで問題にしている FAS のことである。

日産の生産システムの特徴は, 従来の自動車組み立て工場の常識であったベルトコンベヤー方式を廃止し, 「電動式インテリジェント台車」を導入したことである。その「電動式インテリジェント台車」とは, 従来のベルトコンベヤー方式に変わる自走式搬送装置のことである。連続送りとタクト送りが共に可能で任意の位置で停止できるほか, リフト機構を備えているため楽な姿勢で作業ができるのが特徴である。又, 位置決め精度が高いため, 作業を自動化する場合も対応が容易であるとされる。この搬送装置が自走式に転換したことによって, 位置決めから溶接, 溶接後の精度測定・フィードバックまで車体組み立て工程の全てを自動的に行うことが可能となったとされるのである。

ところで, 組み立て工程において自動化が本格的に達成されるのは, ロボットの運動機能が向上し, 組み立てロボットが完成されたことによるのである。組み立てロボットとは, 組立用としていくつかの組立の機能をロボットを中心として複合したもののことである。組立ロボットの周囲にはワークやボルト, ナットの供給装置, ボルト締めつけ機等が配置されている。組立ロボットは, ワークの組立台上への配置, 位置合わせ, ボルト, ナットの所定位置への挿入等を行うものである。組み立ての部品の供給に使用されているロボットはハンドリング用ロボットが多く, 簡単な型のもが多い。又, 部品の移送に多く用いられているロボットは走行型ロボットや無人搬送車である。これに対して, 組み付けには組み立て用ロボットが使用されている。組み立て用ロボットの研究開発は, 知能ロボットの研究に始まり, AI とロボットの複合化やセンサを使ったロボット等がある。それは, 知能ロボット自身が環境や仕事の状況やその変化を感知, 認識してロボットがその判断によって行動を決定できるシステムや知能に関するものである。

自動組立に関する開発システムとしては, 汎用組み立てシステムや組立て用ロボットを中核とするフレキシブル自動組立システムがある。組立て用ロボットとしては, 垂直多関節型組立て用ロボットと水平多関節型組立て用ロボットがある。前者は, 人間の上腕を機械化しようとしたものであり, 後者は, 高精度, 高速度, 高生産を満足し, 挿入作業に対応できるような特性をもつ

ものである。フレキシブル自動組立てシステムとは、視覚装置とロボットを組み合わせることで、製品変更にも柔軟に対処できる組立て装置である。それは組み付け部品の種類が変更されても、ハードウェアを変更せずソフトウェアの変更のみで対処できるのである。

組み立て用ロボットのフレキシビリティを増すために、更には、位置決め精度を補うために、カメラによる位置調整を行う「ビジョンシステム」〔45〕18頁）が用いられている。又、組み立て用ロボットの汎用性を増すために、ロボットハンドの汎用性をたかめる必要がある。そこでは各作業、対象部品に対応する専用のハンドを何種類も用意しておき、作業の変更に応じて使い分けられるが、そのために「精度の高い工具交換装置が要求される」〔45〕18頁）のである。又、交換のための切り替え時間も直接、作業のタクト時間に影響を与えるため、自動化、システム化されたハンド群が必要となる。それには二通りの方法がある。一つは「タレット化」であり、もう一つは「自動ハンド交換装置（AHC）」〔45〕18頁）である。これらにより組み立て用ロボットの機能向上が達成されたのであるが、しかし、現状は、組み立て工程の自動化を全面的に達成するに至っていない。

（C）FA化の展開—安川電機の場合—

機械加工と組み立てラインにおいて柔軟性を確保しながら、自動化を達成しようと意図するのがFAであるが、そのFAという生産設備システムに対して生産管理システムがオンライン化されれば、そこにCIMが成立するといえよう。そのようなCIM化を志向したものとして、安川電機の「モートマンセンター」がある。それは機械加工から出荷までの工程を自動化された生産システムとして構築したものである。ここで問題にする必要があるのは、従来、困難とされてきた組み立てラインの自動化が如何に達成されたのかということである。¹¹⁾

（1）まず、システムの全体の構成であるが、それはホスト・コンピューターの下に、生産管理コンピューターと技術管理コンピューターが配置され、生産管理用コンピューターの下位には、夫々のコンピュータをLANで結んだネットワークが形成されている。従って、システムとしては生産管理システムと、生産設備を統括しているミニコンを通じてプログラマブルコントローラ群即ち、設備制御システムを結んだネットワークとの2系統が形成されているのである。このうち、設備制御システムがサポートしている生産ラインは、部品機械加工FMSラインと、入出庫配膳ライン、自動組立ライン、自動試験ライン、塗装ラインの五つである。

個別システムは、次のような特徴をもつものとされている。

① 生産管理システム。営業部門からの受注予測に基づいて、6か月前から生産計画が立てられる。毎月見直しの上、生産管理コンピューターから部品メーカー、外注工場へと、公衆回線を介してダイレクトに生産計画が連絡される。受注決定後、各工程負荷状況、生産の平準化を考慮して生産計画が決定され、必要な部品は生産の前日にジャスト・イン・タイムで届くよう、ダイレクト発注指示がなされる。生産工程全般に亘ってコンピューターやバーコードによる物と情報の一元化が行われ、工程内の進捗がリアルタイムに把握できるようになっている。

② 設備制御システム。設備制御システムは、各ラインの工程別サブシステムを統制している独立したセル・レベルのコントローラを配置した階層別システムであり、自律分散・自己完結形のCIMシステムである。この3階層制御方式であることによって、上位の管理用のコンピューター

ターは、現場の生産設備の負荷状態や、生産ラインのプログラマブルコントローラとの通信システムに左右されることなく、運営することが出来るようになっている。又、生産ライン管理用コンピュータの下に、一日単位の生産ラインリアルタイム情報管理を担当するプログラマブルコントローラを用いた現場用主操作盤セルコントローラが設置されている。これによって、上位のコンピュータがダウンしても現場側機器のみで生産を続行しうる自己完結形システムが可能となっている。生産ラインを構成する夫々のラインは、主操作盤の下で単独に自動ラインとして機能し、各ライン内の故障が前後のラインに影響を与えないようになっている。このような構成をとることによって、サブシステム内の部分故障が発生したとしても故障を極限化できること、点検・変更時にサブシステムを全体の動作に支障を与えずに切り離すことができること、試運転やシステム立ち上げ時に各サブシステムを同時並行的に試験することで工期の大幅な短縮を実現できる、とされる。

③ 部品機械加工 FMS ライン。ロボット部品の機械加工システムは、ターニングセンター、マシニングセンター等の工作機械と素材倉庫、治具及び無人加工用ワークストッパー、それらの搬送装置、加工後のロボットによる自動洗浄、ロボットによるバリ取り装置から構成されている。ここでは、組み立て順序計画に従って加工指示を行うが、組み立て順序計画は素材の入荷状況、作業の遅れ、機械のトラブル等によって変更することが必要となる。そのため、加工スケジュールは、運転中にもリアルタイムに変更を行うことができ、必要な部品を最小の在庫で、組み立てに供給できるようになっている。システムの特徴は、リアルタイムスケジューリング機能にある。それは機械加工において予め予定することが不可能なトラブルが発生した場合、それ以降の工程のスケジュール変更を、システム運転を実質的には続行させながら行える機能のことであり、オンライン・リアルタイムでの再スケジューリングを可能にしているのである。

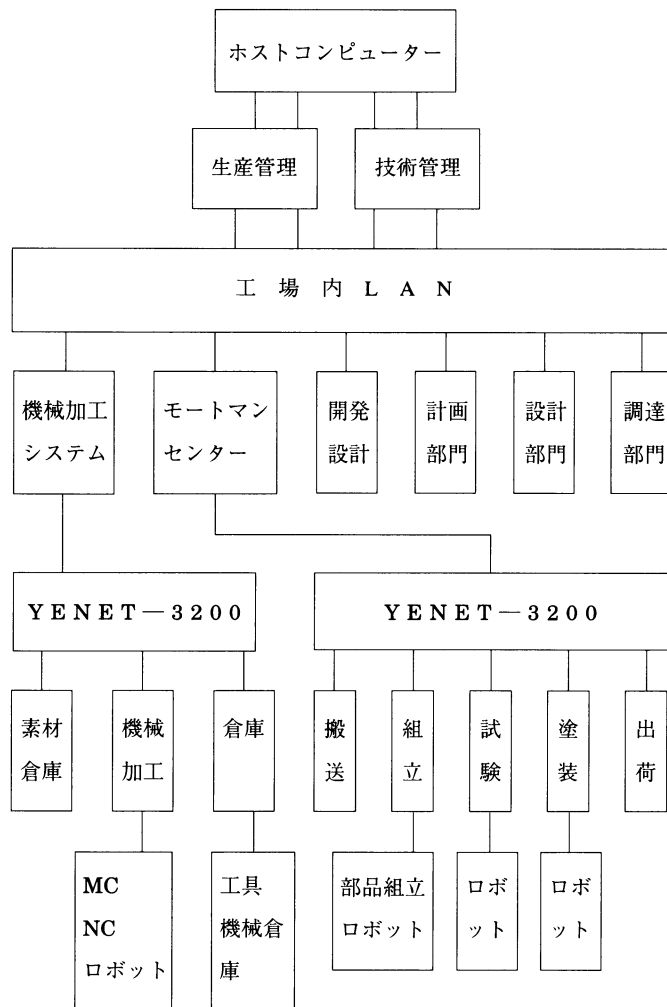
④ 入出庫・配膳ライン。組み立て部品の受け入れ、一時保管、出庫、自動組立ラインへの搬送を行う部品センターとして、自動倉庫、入庫コンベア、配膳コンベア、無人搬送車が設置されている。自動倉庫は、部品の大きさ、重量により、格納区分を行い、効率的な部品保管が行なわれている。受け入れ部品は、バーコードを使って受付処理され、自動倉庫に格納される。

⑤ 自動組立ライン。組み立てラインは、生産台数の多い主力機種を組み立てる A ラインと、大形ロボット、その他の特殊なロボットを組み立てる B ラインの二つのラインから構成されている。組み立てラインでは中央コンピュータからの指示による、単なるブラインドコントロールではなく、ラインの工程別サブシステムが、組み立てワークの種類、形状、方向、位置を自律的に認識し、自己判断によって組み立てを実行するシステムを目指している。

⑥ 自動試験ライン。組み立て完了のロボットの試験は、夜間の無人状態時に自動で行われる。試験に必要な情報は、バーコードから受取り、試験すべき項目が指示される。試験中の状態監視や、試験完了後の各種データアウトプット、及び合否の判定といった一連の作業をプログラマブルコントローラで構成された操作盤にもたせることで、試験の自動化が図られている。

⑦ 塗装ライン。塗装ラインは、全機種を同一ラインで流す混流ラインである。塗装色の多様化のために、作業時の迅速なカラーチェンジが必要であり、それはバーコードにより塗装情報を与えることによって解決されている。

〈「モートマンセンター」の全体システムの概要〉



〔38〕47頁より作成）

(2) 「モートマンセンター」の特徴の一つは、組立ラインがロボットによって自動化され、「ロボットによるロボットの組み立て」が実現していることである。組み付け工程にロボットを導入するに際しては、既に述べたように、高い位置決め精度と「多自由度」という技術的問題を解決することは決定的に重要な課題であるが、安川電機の場合、「ロボットビジョンシステムによる自律的な判断」と「複数ロボットの協調動作」の二つを達成することによって解決したのである。

自動組立ラインは、本体の組み立てとして3ステーション、部品のサブ組み立てとして2ステーションによって構成され、計7台のロボットで組み立て作業を行っている。ロボットの組み立てラインの基本的な考え方は、次のようなものであるとされている。

① 混流一個流しのできるライン。多機種を同じラインで組み立てるため機種変更に伴う人手による段取りを一切行わなくてよいように、専用の組み立て装置を用いず、ソフトのみで機種切り替えに対応できるようにすることである。位置決め用の治具は全く用いず、ロボットと視覚センサーのソフトのみでワークの位置を正確に認識し、作業するという高度の組み立てを行

っている。このため、位置決め等の専用治具が不要で、しかも多機種を機械的な段取りを全く行わずに組み立てることができる。

② 多機能ロボットとしての活用。一台のロボットに多数の作業を行わせるため多数のハンドを取り替えながら、多数の組み立て工程を1ステーションの一台のロボットで行わせる方式が採られている。

③ 複雑高精度組み立てのロボット化。ロボットの組み立てでは、高精度の嵌め合い作業があるが、それらの作業をロボット化することによって、嵌め合いにおける不具合の防止、ネジ締めトルクの高精度管理による品質の安定化が計られている。

ロボットによる組み立ては、「自動組み立てセル」であり、それは、回転軸の組み立て、ロボットの上腕部分の組み立て、部品の一部サブ組み立ての三つによって行われている。これらの組み立てでは、部品の嵌め合いによる組み立てとネジ締めによる締結が主体である。各自動セルは、多機種を機械的な段取りをまったく行わずに組み立てを可能にし、自律的自己完結形の混流1個流し組み立てが容易に行えるようになっている。自動組み立て工程では、部品を嵌め合わせ、ネジによって締めつけていく作業が主体であり、各部品ごとのボルト穴位置合わせには、視覚センサーを用いて確認修正をしながら組立を行っている。

組み立てロボットは、上腕部を保持し位置修正作業をする大形ロボット、部品認識及び水平方向から組み立て作業を行う中形ロボット、組みつける前にベアリングとシャフトの圧入及びグリース封入作業等のサブ組みを行う小形ロボットの3台で構成されている。中形ロボットは、「ビジョンシステム」を搭載して知能化しており、製品の機種判断の他に3次元位置計測と2点間の空間距離の計測作業を行う。大形ロボットと中形ロボットの協調作業により、測定—修正—診断を繰り返しながら、正確な距離を決定する。

作業対象となるアームの位置を位置決めするための治具はまったく用いず、2台の組み立てロボットと「ビジョンシステム」を使った協調作業のみで、自律的に位置を正確に検出し、補正を行って高精密な組立を可能にした。2台のロボットの協調作業でロボットを組み立てていく工程では、1台のロボットで組み付けの位置を3次元的に認識し、その情報をもう1台のロボットへ伝送し、教えられた位置に部品を取りつけていく。更に2台のロボットで位置情報のやりとりを行いながら部品の位置修正を行い、正しい位置に移動させて部品取り付け作業が行われている。

各自動組み立てセルは、「ビジョンシステム」を備え、知能化した組み立てロボットが、ワークの機種を認識することからスタートする。自動セルコントローラには、プログラマブルコントローラを搭載しており、「ビジョンシステム」との情報授受により、上位からの組み立て順序情報との機種照合、ワークの形状認識、位置検出、位置補正を行う。更にロボットのハンド交換、ワーク挿入、ネジ締め、トルク確認、シール塗布、グリース封入、治具の着脱等の作業指示をコントロールして、正確に高精密組み立て作業を行っている。

安川電機では、専用の治具や専用の組み立て装置によらないで、ソフトウェアによる機能の変換システムをFLMS(Fixtureless Manufacturing System)と称している。それは、専用設備を新たに設けず、周辺設備(治具)も最少とし、ロボットを主体とした製造組み立てを行うもので、機械的な段取りを省き、段取りはソフトで対応させるシステムである。それは、多種類のものをフレキシブルに製造でき、設備コストを少なく、立ち上がりを短期間で行おうとする考え方を実現

したものである。

注

- 1) もっとも、「自動化された工作機械が自動搬送装置に組み込まれてトランスファーマシンが成立する」〔19〕145頁)とする見解も存在する。
- 2) 工作機械の運動をプログラムに従って制御する機械としては、第二次大戦後に「配電盤」制御によるタレット旋盤が現れた。これは継電器の配列を変えるだけで機械の準備ができるというのは長所であるが、プログラムの保存ができないし、プログラミングの過程が未だ現場の機械工によって握られていることで、その普及に難点が存していたのである。〔31〕189頁)
- 3) NCの生成過程については、森野勝好氏の論稿〔14〕が詳しい。
- 4) 工作機械における工具の基本的な運動は、三つある。例えば、旋盤加工の場合は、①切削運動（加工物の回転）、②工具の送り運動、③工具の切り込み運動、の三つの運動である。このうち、①の加工物の回転が動力的な活動であり、②、③の工具の運動操作が操作（制御）的な活動である。門脇重道氏は、モーズリの旋盤では、これら「3運動の一つ一つが個別的に、夫々のレベルで自動化されているにすぎない」とされる。切削運動に関しては、「受動部（ベルト車）—伝動部（歯車＝変速機構・主軸）—作用部（チャック）」という形において、送り運動に対しては、「受動部（同じベルト車）—伝動部（親ねじ・往復台）—作用部（工具）」という形において自動化が達成されているが、切り込み運動のほうは「未だ手動で、原動部は、手からの動力と操作・判断を受け入れる部分であって、未だ単純な動力の受動部には還元されていない」のであり、「原動部（ハンドル・目盛り）—伝動部（刃物台）—作用部（工具）」という操作機構であり、それ故、そこでは労働者の「操作的労働を受け入れる余地が存在していた」ということである。これに対して、NC旋盤では、「相互調節機構、作業進行機構」が姿を消し、「加工対象物の回転、工具の送り、切り込みを与える作業機構」が「夫々独立した動力機で駆動される構造」〔10〕24～5頁)となっているとされる。そこでは夫々の動力機に運動の相互関係や進行順序等の関係の調整がなされた信号が与えられて、作業が遂行されていくことになっているのである。
- 5) 現在でも倣い制御方式は、プレス用金型などの工作機械に用いられている。まず、加工対象と同一形状のモデルを木材等で作る。倣い制御用のトレーサをモデル表面に接触させながら一定方向に送り運動をさせる。トレーサからの出力信号が制御情報となり、この信号が常に、ある基準レベル値となるようにサーボモータが倣いコントローラで制御され、トレーサを装着した昇降サドルを運動させる。このサドルにはトレーサと平行に加工用主軸ヘッドが設けられており、被削材にモデルと同じ形状の加工を行う。この方式は、モデルの製作をすれば、複雑なプログラムを行うことなく、3次元の曲面体の加工が可能である。しかし、この方式は、球状の曲面体の頂上部分のように、倣い制御の不可能な領域がある。又、穴あけの倣い加工ができない。加工能率を高めることが困難である、等の欠点がある。そのため、倣い制御の簡便性と、数値制御の多機能性を複合させた、NTC方式をもちいることがある。〔47〕I・19頁)
- 6) トランスファーマシンが現在利用されていないということではない。それは少品種大量生産の要請される生産システムの下では、十分に利用価値のあるものである。
- 7) ロボットにおける「自由度」とは、「転回、旋回、伸縮の三つの基本動作の和」のことであり、ロボットは「機構の多自由度」をもっているからこそ、「人間の四肢に類似した運動」〔7〕76頁)が可能になっているのである。
- 8) 剣持氏は、産業ロボットは、「機械体系の概念、即ち動力機、作業機、伝導機のいずれにも属さない。産業ロボットは、機械体系の概念に当て嵌めれば、これら三者を総合したものであると同時に、記憶、認識（感覚）、判断要素の加わった複合作業機械である」〔50〕61頁)とされている。又、宗像氏は、NC工作機械は「熟練機械労働の構想、制御、執行労働の代替」を惹起したのに対して、産業ロボットは、「マテリアル・ハンドリング搬送の機械化と結び付く不熟練・半熟労働の代替」〔22〕

292頁)を意味するものであったとされている。

- 9) 洪井氏は、両者の相違は、マルクスがマニファクチュアについて、「本質的に違う二つの種類」としたそのことが妥当するとされるのである。二つの種類とは、異種的マニファクチュアと有機的マニファクチュアのことである。異種的マニファクチュアは、独立の部分生産物の機械的組み立てによって作られる製品を扱うもので、時計や馬車を製造するマニファクチュアがそれである。有機的マニファクチュアは、互いに関連のあるいくつもの発展段階、一連の段階的諸過程を通る製品を生産するものである。両者の間には、大工業への転化の仕方に大きな相違があったのである。有機的マニファクチュアが大工業に転化する場合、その生産過程は機械の体系を基礎とするものとなる。その完成されたものが自動機械体系である。即ち、有機的マニファクチュアが機械制大工業に転化するという道では進まなかった。組み立て作業を機械に行わせるためには、人間の腕のように3次元空間を動き回り、精確な位置決めで作業を遂行するような、作業機の運動を可能にする機構を作らねばならない。それ故、異種マニファクチュアの大工業への転化は、多くの場合(素手または道具を用いての)人間の手作業に依ったままで進められたのである。([36] 80頁)
- 10) FMSにおいて搬送の意義を重視するものとして、[49]がある。
- 11) 以下は、[37]、[38]、[39]を参考にして作成した。

参 考 文 献

- [1] 奥村正二『工作機械発達史』科学主義工業社, 1941年。
- [2] 内田星美「鉄と機械」荒井／内田／鳥羽編『産業革命の技術』（産業革命の世界②）有斐閣, 1981年。
- [3] S. リリー『人類と機械の歴史』岩波書店, 1968年。
- [4] 中山秀太郎『機械発達史』大河出版, 1987年。
- [5] 中山秀太郎『オートメーション』岩波書店, 1957年。
- [6] L・T・C・ロルト, 磯田訳『工作機械の歴史』平凡社, 1989年。
- [7] 名城鉄夫『プログラム・感覚・知能』亜紀書房, 1988年。
- [8] 中村静治『現代工業経済論』汐文社, 1973年。
- [9] 慈道祐治「技術の体系性とオートメーション—現代オートメーション論への一視角—」『ME化技術革新と現代産業』（立命館大学人文科学研究所紀要No.55）1992年。
- [10] 門脇重道『技術発達史とエネルギー・環境汚染の歴史』山海堂, 1990年。
- [11] 名和隆央「CNC技術と労働過程の変革」『立教経済学研究』45—3, 1992年。
- [12] 中村静治『現代資本主義論争—80年代の経済学のために—』青木書店, 1981年。
- [13] 慈道祐治「オートメーションの二つの形態, FMSとFTL—現代オートメーションの一局面—」『ME化技術革新と現代産業』（立命館大学人文科学研究所紀要No.55）1992年。
- [14] 森野勝好「NC工作機械の普及と『機械体系』の変化」『ME化技術革新と現代産業』（立命館大学人文科学研究所『紀要』No.55）1992年。
- [15] 東芝機械マシニングセンター研究会『知りたいFMSとMC』ジャパンマシニスト社, 1986年。
- [16] 川勝邦夫『NC工作機械の基礎』パワー社, 1979年。
- [17] H. ブレイヴァマン『労働と独占資本』岩波書店, 1978年。
- [18] 北口康雄『NC工作機械入門』理工学社, 1990年。
- [19] 山下幸男『メカトロニクス時代の労働』新評論, 1990年。
- [20] 福田力也『工作機械入門』理工学社, 1990年。
- [21] 中村静治『生産様式の理論—現代経済学批判—』青木書店, 1985年。
- [22] 宗像正幸『技術の理論—現代工業経営問題への技術論的接近—』同文館, 1989年。
- [23] 日本機械学会編『メカトロニクス入門』（メカトロニクスシリーズ, 1・入門編）技報堂出版, 1984年。
- [24] 山岸正謙『NC工作機械の入門』東京電気大学出版局, 1986年。
- [25] 斉藤二郎『NC加工のトラノマキ』（技能ブックス14）大河出版, 1974年。
- [26] 人見勝人『生産システム論—現代生産の技術とマネジメント—』同文館, 1990年。
- [27] K. R. ギルバート, 中山秀太郎訳「工作機械」H. シンガー『技術の歴史(8)』筑摩書房, 1963年。
- [28] 小野隆生「ME技術の特質とその歴史的な位置付け—現代の経営管理過程分析のための準備作業として—」『三田商学研究』29—3, 1986年。
- [29] N. H. クック「完全無人工場の実現」『別冊サイエンス・メカトロニクス』1981年。
- [30] 草間俊夫「『科学=技術革命』の展開」柿崎・草間・増田編『危機における現代経済の諸相』八朔社, 1992年。
- [31] 中峯照悦『労働の機械化史論』溪水社, 1993年。
- [32] 中峯照悦「James R. Brightの機械化17段階表について」『社会文化研究』（広島大学）13, 1987年。
- [33] James R. Bright "How to Evaluate AUTOMATION" *Harvard Business Review* 33—4, 1955.
- [34] 能塚正義「ME技術革新と企業構造」『経済学論集』（大阪経済法科大学）（Ⅰ）14-1・2（Ⅱ）15-1・2（Ⅲ）15-3・4（Ⅳ）16-3・4。1991～3年。
- [35] 藤本英雄『コンピューター統合生産システム』コロナ社, 1993年。

- [36] 洪井康弘「ME技術と『柔軟性』—NC工作機械と産業ロボットに注目して—」『名城商学』43-4, 1994年。
- [37] 米谷英資・下城紀雄「ロボットがロボットを作るCIMシステム」『日本ロボット学会誌』10-3, 1992年。
- [38] 高森克廣「ロボットによるロボット自動組み立てシステム」『自動化技術』24-1, 1992年。
- [39] 大塚涼二「産業用ロボットモータマン生産のためのFAシステム」『技報・安川電機』55-3, 1991年。
- [40] 安川電機製作所編『メカトロニクスのためのサーボ技術入門』日刊工業新聞社, 1986年。
- [41] 長谷川幸男「生産システムの自動化におけるロボットの役割」『日本ロボット学会誌』5-3, 1987年。
- [42] 杉本浩一「フレキシブルロボットシステム」『日本ロボット学会誌』10-3, 1992年。
- [43] 高島覺「組み立て作業と自動組み立てシステム」『日本ロボット学会誌』10-3, 1992年。
- [44] 長谷川幸男「CIMとロボット」『日本ロボット学会誌』10-3, 1992年。
- [45] 牧野洋・古屋信幸「組立の自動化とロボット」『日本ロボット学会誌』10-3, 1992年。
- [46] 岩田一明・中沢弘『生産工学』コロナ社, 1988年。
- [47] 橋本・東本著『コンピューターによる自動生産システム』I, II, 共立出版社, 1987年。
- [48] 剣持一巳『マイコン革命と労働の未来』日本評論社, 1983年。
- [49] 不二越搬送システム研究グループ著『知りたい搬送』ジャパンマシニスト社, 1990年。
- [50] 佐久間・斎藤・吉田・鈴木共著『工作機械—要素と制御—』コロナ社, 1992年。
- [51] 小島利夫「加工セルを基本としたFMS—ロボットCNC装置を中心に—」『機械技術』30-1, 1982年。
- [52] 吉田嘉太郎「FMSの現状と今後の課題」『機械技術』30-1, 1982年。