

○北 真収（野村総研），渡辺千仞（東工大社会理工学）

1. はじめに

日本は、製造技術に特徴を持っているといわれるが、日本のモノづくりを支える産業に、産業用ロボット、工作機械、半導体製造装置などの設備産業がある。これら産業の製品は、製造現場で蓄積されてきた技能の自動化装置でもあるのだが、とりわけ、産業用ロボットは、その開発・生産や利用において、世界の中で群を抜いた存在である。

本稿では、1970年代から1985年までのロボット技術生成期¹に着目する。欧米からのロボット技術導入に端を発した技術のスピルオーバーにおいて、特に、1973年と1979年の2度にわたる石油ショックを引き金に、ユーザー側は少品種大量生産から多種少量生産へと漸進的な生産革新に取り組んだ。こうしたユーザーの製造プロセス技術に対するロボット・メーカーのスピルオーバー同化能力について実証的に考察し、競争力の源流を明らかにする。なお、ロボットのユーザーについては自動車メーカー（溶接用・塗装用）²を念頭に置いている。

2. 非連続的イノベーションの伝播への適合

技術はソフトウェアとハードウェアが組み合わさった状態として捉えられるが、ロボット技術についても、マニピュレータに関わるハードウェアと制御に関わるソフトウェアの関係を意識しながら考察する必要がある。

産業用ロボット技術は、特許を持つ米国から技術提携や製品輸入を通じて日本へスピルオーバーしてきたが、国内で普及する過程では大きな技術的イノベーションの伝播に適合する必要があった。1つは、非連続的イノベーションというべきME（マイクロエレクトロニクス）技術のスピルオーバーによるパラダイムチェンジであり、もう1つは、ロボットを利用するユーザー側での多種少量生産の漸進的なイノベーション³のパラダイムチェンジである。前者はハードウェアに、後者はソフトウェアに強く影響を及ぼすが、両者は相互に関連し合っている。

まず、ME技術、即ち、集積回路技術の進歩は、マイクロプロセッサやマイクロコンピュータ（マイコン）を出現させた。1971年に4ビット長、1974年に8ビット長、1978年に16ビット長のマイクロプロセッサが実用化された。1970年代は、出現だけでなくその後の性能（命令実行速度、動作速度、演算またはバスデータビット長）が、年次経過に対し指数関数的に向上した時期でもあった。⁴また、高集積化と反比例する形でビット単価も低下していった。⁵

¹ ロボット産業の生成時期について、1968年～1980年までを生成期、1981年～1985年までを成長前期として捉えている文献もある。しかし、本稿では、産業としての基盤は1968年～1985年にかけて形成されたと考える。

² 1979年までは自動車が第1位の納入先であった。1980年以降は電気機械器具製造業が第1位を占めている。特に、プリント基板への部品を挿入・装着するための数値制御ロボット（NCロボット）等が導入されたためである。

³ ポーターは、日本の自動車メーカーは製造プロセス技術のイノベータになったとみている（ポーター[1]）。

⁴ 楠[2]を参考にした。

⁵ 例えば、半導体メモリのビット単価は、1974年に1円、1980年に6銭に下落した（産業学会編[3]）。

産業用ロボットにおいては、1チップ CPU による座標演算機能のために、それまで制御が難しく機構が複雑であった関節型ロボットの操作が一気に単純化した。⁶また、電力制御用半導体素子製造技術とマイクロコンピュータ関連技術の進歩によって、パワートランジスタが普及し、サーボモータの大容量化、小形化が実現し、油圧式に代わる電動化を加速させた。制御装置は、マイコンや IC メモリ化によって、複数のロボットを使用する場合、有機的に動作させるためにシステムとしての制御を行なう方向へ展開し始めた。

1977年に安川電機は、トランジスタドライブの DC サーボモータ、制御装置に 8ビットマイクロプロセッサを採用した日本で初めての電動ロボット（アーク溶接用ロボット）を製品化した。1970年代半ばの 8ビットマイクロプロセッサ、トランジスタドライブの出現からあまり遅れることなくスピルオーバー効果として活かしている。また、川崎重工業は、スポット溶接用ロボットでは、油圧式で市場シェアが高かったために、電動化に出遅れたが、それでも開発要員の傾斜的な再配分によってわずか 1年足らずの期間で電動ロボットを製品化した（1983年）。このように、非連続的なイノベーションであった ME 技術に対して、そのスピルオーバーを吸収し、ハードウェアに同化させるまでに、大きなタイムラグが生じていない。

3. ユーザーの製造プロセス・イノベーションの伝播への適合

1970年代に入って、1973年の第1次石油ショック、1979年の第2次石油ショックによって、物価、賃金が高騰し、国際競争力を維持するために、生産性向上へのあらゆる手段の導入が強く要請された。⁷石油ショックによる不況は、日本の産業構造を変えた。プロダクトアウトから市場の要求への対応（マーケットイン）である。

例えば、自動車の生産方式では、1970年代後半から、従来の同一車種大量生産から、多種少量生産へと変わっていった。⁸しかもそのときどきの市場の要求に即応して車種間の生産数量の調整を図るとなると、一つのラインにボディの形も大きさも異なるいくつもの車種を流す、いわゆる汎用混流ライン⁹が生産性維持の点から必要になってくる。モデルチェンジに当たっても、旧モデルから新モデルへの移行を同一の生産ラインを使って無駄なく実現したいと考えた。このため、設備投資は、専用機から汎用性に富むロボットへと重点を移し、フレキシブルな生産体制の構築を急いだ。

10

ロボット技術生成期には、スポット溶接用ロボット（油圧式）では川崎重工業、塗装用ロボットでは神戸製鋼所が高い市場シェアを握った。いずれも、外国から技術導入しているが（川崎重工業は1968年、神戸製鋼所は1973年）、日本の自動車メーカーの要求・要望に応えた外国オリジナル仕様ではない実質的な国産化を実現するのは、川崎重工業（スポット溶接用ロボット）は1976年、神戸製鋼所（塗装用ロボット）は、1983年であった。

⁶ 例えば、1980年代に入って、多関節ロボットの複合極座標系の理解しやすい直角座標系への座標変換演算処理はマイコンによって初めて可能になった。大容量デジタルメモリを必要とする CP 制御にも IC メモリによって対応できるようになった。

⁷ 1974年、第1次石油危機後の狂乱物価に対し、ベースアップは史上最高の 32.9%に達した。

⁸ トヨタクラウンの発注可能仕様数をみると、1966年の 322種類から1978年には 101088種類へとバリエーション化が図られている。また、現実には生産された仕様数と車両生産台数の関係は、1仕様当たりの生産台数は 11台（トヨタの中の4ブランドのある3ヵ月間の生産）ときわめて少ない。当時の自動車の製品多様化については、浅沼[4]が詳しい。

⁹ 混流生産は、柔軟な生産計画による市場の要求への迅速な対応を可能とし、さらに生産設備への過剰投資を防ぐ一つの方向を示すものとなった（日産自動車 50年史）。

¹⁰ 例えば、マツダでは、車体組立は 1970年代～1980年半ばをフレキシブル対応/多車種混流と位置付けている（マツダ技術技能史）。

ロボット・メーカーが、ユーザー側の製造プロセス技術に適合するには、比較的長い時間を要している。安川電機の場合も、1960年代後半から既にロボット事業の種が蒔かれていたが、用途を絞り込むのに時間を要した。

表 1 実質的な製品化に至るまでに要した期間(産業用ロボット)

	導入技術の国産化 (川崎 2630 型)	日本初の電動ロボット (安川モートマン-L10)	油圧からの電動化 (川崎 EA65 型)
製品化までの期間	約8年 (1968年-1976年)	約5年 (1972年-1977年)	約11カ月 (1982年9月-1983年7月)

制御に関わるソフトウェアは、制御理論に基づいてマニピュレータを動かすハードウェアに近い技術とユーザーの作業工程で求められる機能を最適化させる適用技術に分かれる。当時の自動車の同一生産ラインでの混流生産やモデルチェンジ移行期の新モデル・旧モデルに対応するには、作業の状況を細分化し1つ1つデータとして積み重ねて、ロボットの最適な使い方(アプリケーション・ノウハウ)を蓄積することが極めて重要であった。ロボットが油圧式に代わって電動化されていっても、油圧式で蓄積された適用技術はそのまま受け継がれた。

ユーザーの製造プロセス技術は、設計図面、技術仕様書などの文書に情報が体化した情報技術として存在するものと職業能力として人間に体化した人的技術として存在するものから構成されている。¹¹むしろ、製造プロセス技術には、製品技術と比べると、知識化しにくい技能の部分が多く含まれている(例えば塗装など¹²)。しかも、製造や品質に対する考え方がユーザー間で微妙に異なる。こうした点が吸収・同化を困難にさせている。

4. メーカーとユーザーのインタラクション

結果的には、ロボット・メーカーが自動車の製造プロセス技術を吸収し、同化させてスビルオーバー効果として活かしたのであるが、その過程においてユーザーである自動車メーカーとの間で濃密なインタラクションが繰り返されている。

1970年代は故障のみならず精度が十分でないことによる作業ミスも多かった。ロボットを納入した後でも、不具合に対する対応、機能面での要求に対する改善や手直しが、売り手と買い手の垣根を越えて行なわれている。例えば、川崎重工業では、営業とは別に適用技術者をユーザーに派遣して、ユーザーの生産技術担当者と一体になってロボットシステムのエンジニアリングを実施している。また、トキコでは、マツダ防府工場(1982年)への塗装ロボット納入に当たって、担当者が1年半の間常駐して、ユーザーと共同作業を行なっている。¹³こうして、自動車の製造プロセス技術に関する特有の技術力¹⁴を着実に習得し、蓄積していった。¹⁵

一方、ユーザーである自動車メーカーにおいても、ロボットのバグやアークスタートなどの不具合で生産ラインが止まるシステムダウンは、原価低減と生産性向上のために極力少なくしたいところであった。製品設計においても、ロボットの活用を意識して、従来電気

¹¹ 小川[5]は、技術を情報、人間、機械の固定的な組み合わせ状態としている。

¹² 塗装に比べて、溶接の場合は溶接工学があるように、知識化できる部分が多いとみられる。

¹³ マツダ・塗装技術部長嶺氏へのインタビュー調査(2002年9月20日)に基づいている。

¹⁴ 自動車ボディ図の解説、溶接工法や工場設備の把握など。

¹⁵ 川崎重工業・ロボットビジネスセンター前田氏へのインタビュー調査(2002年7月31日、9月17日)、明石工場50年史(川崎重工業)などを参考にした。

やガスで行なっていた溶接をスポットに変更したり、車体構造をロボットに適する設計に変えていった。¹⁶

ロボット・メーカーは、「人間の作業をそのまま吸収したい」。自動車メーカーは、「ラインが止まっては困る」、「ラインを汎用的に使いたい」という車体組立ラインの稼働率向上、生産性向上がインセンティブとなってロボット・メーカーへの作業協力へ動いたと考えられる。この時期、ユーザーと共同開発を行なうロボット・メーカーが増加傾向をみせている。¹⁷売り手と買い手がはっきり分かれてしまうのではなく、重複し合いながら入り組み合って濃密なインタラクションが繰り返され、その結果、協同的に問題解決が図られていった。インタラクションの過程で情報共有が促進され、ロボット・メーカーは、スピルオーバーした自動車の製造プロセス技術を同化させたのである。

また、日本では、メーカーとユーザーの担当者も水平的調整が行なえる状況であったために、同化のスピードが速められ、ロボットの導入も進んだとみられる(米国では生産現場に権限を委譲することに懐疑的であったために日本に先を越され、導入も進まなかった)。

5. おわりに

ロボットのソフトウェアに影響を及ぼすパラダイムチェンジであったユーザーの製造プロセス技術をスピルオーバー効果として活かすのは、ME 技術のそれと比べても決して容易でない。しかし、日本のロボット・メーカーが、同化させて効果として活かせることが、今日の国際競争力を築く大きな要因になった。

IT (情報技術) が進展する 1990 年代以降の情報化社会では、工業化社会でのメーカー主導型に代わって、メーカーとユーザーがインタラクションによって主導するといわれる。しかし、産業用ロボットの生成期である 1970 年代～1980 年代前半に、既に、メーカーとユーザーのインタラクションを通じて協同的に問題解決が図られている。こうした関係は、技術的ではないが 1 つの制度的なイノベーションとみなすことができる。

産業用ロボットは、改善や改良を重ねながら累積的な成果を生み出し、自己増殖的に発展してきたのであるが、その源泉ともいえるメーカー・ユーザー間のインタラクションによるスピルオーバー効果について、次の段階では、技術ストックに基づくコスト関数を用いて計量的に分析していきたい。

参考文献

- [1] Porter, M.E. *The Competitive Advantage of Nations*. New York: The Free Press (1990). (土岐ほか訳、国の競争優位、上下、ダイヤモンド社 (1992))
- [2] 楠菊信、マイクロプロセッサ、丸善 (1994)
- [3] 日本産業学会編、戦後日本産業史、東洋経済新報社 (1995)
- [4] 浅沼万里、日本の企業組織革新的適応のメカニズム、東洋経済新報社 (1997)
- [5] 小川英次、技術移転の理論モデル形成に向けて、小川英次・牧戸孝郎編、アジアの日系企業と技術移転、名古屋大学出版会 (1990)
- [6] 渡辺千仞編、技術革新の計量分析、日科技連出版社 (2001)

¹⁶ マツダ・車体技術部前島氏へのインタビュー調査(2002年9月20日)に基づいている。

¹⁷ 日本ロボット工業会調査資料に基づく。例えば、川崎重工業は、トヨタとスポット溶接用省スペースロボット、ハンドリング用ロボットを開発している(1988年)。