

ロボットの経済性評価

小川 英次

1. はじめに

産業用ロボットに対する関心は、(1) 昭和50年代の経済的不振、その結果としておこる企業間競争の激化と、(2) エレクトロニクス技術進歩によるコスト・ダウンとが同調したことによっていちじるしく高まった。企業は競争力維持のためにコスト・ダウンのための有力な手段を求め、エレクトロニクス技術は企業の期待にこたえる経済的な機器、その1つである産業用ロボットを提供することに成功した。これが昭和50年代の産業用ロボット・ブームの主な原因と考えることができる。

考えてみると、本体が1000万円のプレイバック式ロボットを、労働者に要する年間費用と比較してみると、いまではロボットがかなり経済的だなどの企業にも思わせるものがある。たとえばロボット1台が労働者1人に代置されると考えられるとき、計算の簡略化を考慮して労働者の年間所得250万円、企業が負担する労働者の福利、厚生、その他の諸費用を、同じく250万円とすると(この仮定は諸統計に照らしても、必ずしも不当な推定ではない。)、労働者1人に要する年間費用は500万円となる。1000万円のロボットで労働者1人が代替されるとき、現価によらないで単純計算すると、ロボット投資の回収期間は2年である。企業にとって望ましくない影響が他にはないとすると、この投資はおおむねゴー・サインが出る。

たとえ技術進歩が激しくてもである。ロボットの価格が量産によってさらに低下し、労働者に要する必要が年々高まるとすると、企業にとってのロボットに対する投資誘引はいよいよ高まる傾向にある。

しかしこの傾向は、日本のロボット保有が1980年末なお1万5000台にも満たないにもかかわらず、失業問題が取沙汰されてブレーキがかけられる方向にある。就業者人口が五千数百万人のレベルのわが国でこの始末である。実際のところはまだ議論するに足る情報が存在しないにもかかわらず将来に関する議論が多すぎるように思う。この点に関連して私たちは、ロボットの技術的ブレークスルーと、経済的ブレークスルーを区別してかかる必要がある。

企業としては、ロボットの開発・普及の動向を監視する必要はあるが、メーカーによって発表された先端ロボットを導入して、ただちに経済的活用が可能かどうかは、十分テストしてみなければ正直いってわからない。周知のように、(1) 技術的アイデア、(2) 技術的成功、(3) 商業的成功は、各々別個の段階であり、産業用ロボット開発も例外ではない。商業的成功の後にはじめて社会的影響が出てくる。つまりロボットをめぐる失業の議論は、商業的成功を前提としており、その時期については必ずしも健全なデータもないので不明確であることが多い。

最近喧伝されるFMSにしてもかなりきびしい加工材質の限定、加工工具の限定、加工種類の限

定によってはじめて経済的運転が可能となるように思われる。したがって、文字どおりの多品種少量生産の経済的遂行は、今日一般に思われるほど急速・広範に進むものとは考えがたい。産業用ロボットについてもしかりである。本稿は、上述のような趣旨に照らしてロボットの経済性評価をどのように考えたらよいかをまず明らかにし、ついで全般的評価の枠組を踏まえたうえで経済性評価を企業レベルで少し詳細に考えてみる。そして第3に、経済性評価にさいしてロボット導入工場のもつ固有技術水準とロボット活用のための学習工数を考えることの重要性を述べ、産業用ロボット導入の経済性評価法のモデルを提案してみたい。

2. ロボット評価の視点

産業用ロボットの評価は、(1) アイデア段階、(2) 技術的成功、(3) 商業的成功、(4) 社会的影響の諸段階で各々評価されねばならないのだが、技術的な一応の成功の段階で一挙に社会的影響を論ずることが多い点についてはすでに述べた。しかし商業的成功を産業用ロボットが納めるためには、なおなすべきことは多い。ここでは、商業的成功ならびに社会的影響の段階の評価の視点を企業のレベル、産業のレベル、一国の社会のレベル、国際社会のレベルに分けて、どんなことが問題としてクローズ・アップするかを説明する。

(1) 企業のレベル。企業のレベルでロボット利用の評価をするとき、当該企業の技術レベルが高いか低いかによってロボットの自家開発か、他社との協同開発か、他社からの導入かを評価する問題がある。すでに企業にロボット技術の蓄積があれば、自家開発が経済的にみて望ましい。しかし多くの企業は、ロボット技術の蓄積が少ないので導入のケースが多いだろう。そして導入成果の上がるにつれて他社との協同開発も可能となる。

企業がロボットを購入しようとする場合、当然経済性評価が投資問題として行なわれる。その詳細は次項に論じることとするが、要点をあげれば、次のようである。産業用ロボットが、技術的に

にみた直接的経済効果に関連して評価されることが多く、企業全体的に評価されることが少ない。特に投下資本を、産業用ロボットに振り向けるより、広告費に投入したほうがよいとか、海外市場調査にあるいは、新材料の研究開発費に投下したほうがよいかどうかと比較して評価されることは少ない。多くの場合、産業用ロボットを入れるか入れないかという評価が行なわれる。

その理由を考えてみると、考えているロボットの投資効果が必ずしも明らかでないことにも一因がある。特に大きな生産システムのなかにロボットが組み込まれるとき、その純効果の推定は予想外にむずかしいのである。その結果、比較的確実と思われるロボット周辺の技術経済的效果に注意を集中することになる。つまり企業レベルのロボットの経済性評価ですらその効果的遂行は困難である。

(2) 産業レベル。ロボット導入を企業間レベルで評価すると、興味ある問題が出てくる。それは技術の企業間格差が拡大する点である。すでに若干の聞き取り調査によっても、ロボット導入の難易度は、企業のもつ固有技術水準と大いに関係がある。それはしばしば大企業と中小企業の技術格差拡大としても取り扱うことができる。電子製品製造の業界で、自動挿入機をはじめとする高度エレクトロニクス機器の出現は大企業の内製化を押し進め、中小企業の受注喪失をもたらすことも少なくないといわれる。つまりここでのロボットの評価は、ロボット技術が大企業に集中する傾向をめぐって行なわれることとなる。日本の製造業が多くの下請中小企業を抱えている事実注目すれば、ロボットは、日本の下請関係の再編成の是非をめぐって評価されるところとなる。

産業レベルのロボット評価は、地域に同一産業が集中していると、地域労働者の失業問題をひきおこすこともある。当該地域が単一産業に特化し、他に雇用を吸収できる産業がないと、産業用

ロボットの競争的導入は失業問題、とりわけ日本にあってはパートタイマーの仕事喪失をまず最初にもたらずであらう。最終的には失業の多発という地域産業問題をロボットの商業的成功によって進む普及がひきおこすかもしれない。

産業レベルでのロボット評価で、産業間問題もおこる。一産業でのロボットの商業的成功、したがって普及の進行は、他産業へも影響をおよぼさずにはいない。一産業でおこった技術格差問題、下請構造問題、失業問題は他産業へ波及する。もちろんロボットのもたらず積極的效果も含めて種々の波及がおこる。

(3) 社会レベル。ロボットの普及は究極的には国内社会全体の問題として取り扱われるだろう。それは幾多の商業的成功をロボットが納めたうえのことである。この段階での議論が、現時点においては確たるデータもなしに議論されていることはすでに述べた。しかしロボットがいたるところで使用される日がくると、そこでは、産業のみならず、あらゆる社会の隅々でロボットが機能する。人間はロボットとの関係で人間にふさわしい生活を送ることが基本的な狙いとされなければならない。アセスメントということがよくいわれるが、ロボット時代に人の住みよい社会を創り出すのは、人の主体的努力によって可能であり、みずからの責任でもある。ロボットの大量社会進出によって、人間社会が崩壊にひんすると考えるのは、人間の愚かさを前提とする考えである。

(4) 国際社会レベル。ロボットの技術的成功と商業的成功は先進国間にとっての競争点だろう。一刻も早く技術的成功を、そして商業的成功を狙う各国間の角逐は激しく、普及競争がつづく。問題は普及に差が出てきたときである。まだ議論できるほどに実用されているロボットの数が少ないのに、日本に対して他国の警戒心の強いのは、その保有比率にある。それは日本が圧倒的に高い。1980年末、保有率は63%弱と推測されている。これが他国の警戒心を高め、摩擦の源になる。

日本もしくは先進国と発展途上国の関係が、ロボットの商業的成功、したがって普及の進むなかでどうなるか。ロボットの導入、活用プロセスを細かく観察すると、そこにはロボットを使いこなす新技能ともいべき体験によってはじめて学習できる部分が散存している。ロボットは一般に予想されるほど使いやすくないのである。それは1つにはロボットのやわらかい高度技術性にあるし、2つは加工・組立の固有技術とロボット技術のドッキングの困難性にある。

いずれにせよ、ロボットに関連する技能蓄積は格差となってあらわれ、先進国と発展途上国の差は容易に縮まらないであろう。これに関連した良い例がアメリカと日本の電算機をめぐるソフトウェア格差である。日本の各社は急追しているがIBMのソフトウェアに容易に追いつけないという。高度の知能を背景にした人間の新たに造り出される技能分野は、先発と後発、特に先進国と発展途上国の差を拡大することはあっても、縮小することは少ないだろう。つまり、ロボットをめぐる技術格差も、先進国と発展途上国の間でますます開く恐れが大きい。

3. ロボットの技術経済的評価

ここで試みる技術経済的評価は、むしろ限定的なものである。まず最初に企業レベルで考え、その後で工場または職場レベルで考える。

(1) 企業レベルでの評価。ロボット導入を企業レベルで考えることは、ロボット投資がそれ以外の企業が行なうことのできる投資案より経済的で有利なことを確認することである。企業レベルでロボット投資が企業にとって有利とされ実行されるのは、次の2つの状況においてである。1つは、資本に制約がなく、投資案に必要な資本はつねに調達できると仮定できる場合、

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+K)^t} - C_0 > 0$$

の条件を満たすロボット投資案が採用される。ロ

ロボット投資案が競合し、1つだけ採用されるなら、NPVの大きいほうを選ばれる。ここでNPV=純現在価値、 n =耐用年数、 R_t = t 期の投資から上がる利益、 K =ロボット以外の投資案で上げ得る利益率、 C_0 =期首投資額である。ここで注目すべきは K の決め方であり、 R_t の測定が容易でない点である。

2つは、調達資本に制約があり、一定額をめぐってロボット投資案を含む若干の投資案が競合する場合である。このときロボット投資の投資利益率が他案にくらべてより高いことが求められる。この場合、算式は次のように示される。

$$\text{投資利益率} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+K)^t}}{C_0}$$

この場合でも、 R_t の測定困難、 K の決定のむずかしさがともなう。

(2) 工場レベルでの評価。ロボット投資案を投資案の1つとしてとらえ他案と相互比較するのが企業における評価法であるが、現実には、上にあげた R_t (t 期の利益)、 K (当該投資案以外の投資で上げうる利益率、ときには市場利子率が用いられる)、 C_0 (期首投資額)、 n (耐用年数)について確定困難性がある。したがって工場レベルでは、比較的数値の具体的に現われる技術的側面に密接にかかわる経済性に注意を集中する。

最も簡単なものは、ロボット導入によって生じるであろう省人効果をみるものである。1台のロボット導入が何人の作業にとって代りうるかを考える。いま1台1000万円のロボットが、年500万円のコストがかかる労働者にとって代りうるものとする。この場合の経済性はどうか。現価を考えず、単純に考えると、このロボット投資は2年の労働費用の節約で回収できるから、進めたほうがよいとされる。しかしこの評価法は、多くの前提をもっている。その前提が好ましく働いているかぎり、この方法はかなりの説得性をもっている。はたして暗黙の前提は企業に好ましく働くであろうか。それがそうは働かぬ。

まず第1に、当該ロボットが、真に工場現場の特殊性にマッチしているだろうか。この現場の特殊性にロボットがマッチしていないまま導入されると、ロボットのために既存の生産システムが手直しされねばならない。その手直しに工数がかかるかどうか、円滑にいくかどうかで経済効果は異なる。最悪の時には使いものにならぬロボットとして放置される。

第2に、導入されるロボットは故障しないと仮定される。この仮定のもとに生産システムにロボットが巧妙に組み込まれると、その組み込まれ方が適切であればあるほど、故障したときの生産システムのこうむる遊休損失は大きい。故障しない前提が狂ったら結果はみじめである。また運悪く故障しても、すぐに現場で修理できればよいが、そんなわけにいかないことが多い。ロボット・メーカーの保全体制の良し悪しもこの場合、ユーザーの経済性に密接な関係がある。全体として故障しないにこしたことはない。

第3に、ロボットの経済性はその稼働時間に関係がある。導入したロボットが24時間操業するだけの仕事量が確保できるかどうかは、前項の故障しないことと合わせて重要な経済的条件である。24時間フル操業するに足る仕事を得られず、わずか1日数時間稼働させる受注しかないとき、ロボットの経済性はいちじるしく低下する。不確実な受注能力の前提は、導入したロボットの経済性見込を不確実なものとする。

第4に、導入したロボットに取り替えられる機器さらには作業があると、その機器の遊休損失、最悪のときは埋没原価が発生する。作業員についても遊休損失、配置転換のための訓練費が発生するだろう。また作業員の従来から蓄積してきた技能が一挙に無価値となってしまうこともある。塗装ロボットが塗装工にとって代り、かなりの経験ある塗装工が塗装ロボットの下働きになることは現実におこっている。これらのコストが小さくて無視できる時のみ、導入ロボットについての単純

な経済計算が可能である。

第5に、ロボットの導入によって従来の材料に仕様変更がおこることもある。作業者は現在のロボットにはできない数々の補正作業をほとんど無意識のうちに行なっている。これをロボットに交代させると材料の仕様は精度的にもきびしくなり位置決め精度も高くなる。おまけにロボットに投入される情報の質も高いことが要求される。これらはいずれもコストの新たな発生であり、ロボット導入のためのシステム調節コストである。

第6に、上の材料仕様の変更、取り扱いのための情報精度の高まりは、ロボット工程の前工程の調整でもある。同様にロボット工程の後工程にも、ロボット導入が影響を与えるだろう。つまりロボット導入は前後工程に影響を与えずにはおかない。ロボット本体を導入して省人効果いくら、何年で回収できるとする簡単な経済評価法は、ここでいう前後工程の調整が無視できるコストでしかないと前提しているのである。しかしロボットの高級化を前提とすると、この仮定は必ずしも適当と考えることはできない。

第7に、ロボット導入は平行する工程にしわを寄せてはいないかという点である。ロボットが工場にかかる特定工程の仕事の全部を担当すればよいが、現実にはそうではない。ロボットのできる仕事とそうでないものがある。ロボットの円滑稼動のために、従来の機械群にしわが寄って、その稼働率が下がれば、それはコストである。

第8に、以上にあげたところは、導入されるロボット単体ならびにその周辺の技術システムに関するいわば変化のコストに触れたのである。しかし、このロボット導入が現場作業者に与える影響は含まれていない。現場作業者のロボット導入への反感と不安、労働組合の不信がすでにわが国でもおこりつつある。現場作業者の協力を得なければ、ロボットの導入は円滑に進まないだろう。そのため作業者の理解と協力を得るための教育活動、再訓練活動、より密接な関係者間のコミュニ

ケーション活動が必要とされる。これらもロボット導入のために必要不可欠なコストである。単純なロボット導入の経済性評価はこのコストも無視できるほど小さいと仮定している。

以上あげたところは、ロボット導入にさいして暗黙のうち前提されている諸条件が狂ったら、およそ経済的効果を上げないであろうことを示すための例であった。企業によって導入に成功したり、失敗したりするのは、上の暗黙に影響なしと前提された諸条件の働きに関係がある。

4. ロボットの経済性評価に関する 1つの提案

前節でロボットの導入をめぐる企業と工場レベルでの経済性評価法について概説したが、筆者の最近におけるロボットの導入をめぐる企業の実態観察によれば、経済性評価は、従来とは若干異なった視点から行なわれる必要があると考えている。ここではその試論的提案を述べることにしたい。提案の狙いは、導入しようとするロボット技術と工場のもつ固有技術水準のギャップに注目する点にある。さきに述べたように、企業が特に特定の工場がロボットを導入するにさいして、省人効果で投資は2年で回収と予想しても、あるものは成功し、他は導入にもたつき、容易に所期の成果を納め得ないということがよくある。

その理由を考えてみると、それは導入をもくろんだ工場の保有する固有技術水準に大いに関係があるように思われる。電気、電子に強い工場—それは、専門技術者、専門技能者を多数保有し、多くの高度な電子機器を使いこなしてきた経験がある。その工場で数値制御ロボットあるいはまた知能ロボットの現場活用がはかられたとしても、成功する度合は高いだろう。ところが電気、電子になじみが少なく、専門技術者もいない中小機械工場の場合を考えてみよう。ここでプレイバック式ロボットの導入を考えるとその工場は、事前に作業者をロボット・メーカーへ研修に派遣するだろ

う。その期間は3カ月かもしれない。しかしその導入はしばしば困難をきわめ、メーカーから技術員が派遣されて泊りがけで現場指導してもらわねば活用できないだろう。ある工場はこれに2カ月かかったとっている。この場合はむしろ幸運で、中小工場の場合、メーカーのエンジニアがそんなに長期にわたって指導してくれることはまずない。この例の場合、成功したら大量発注の見込のあることをロボット・メーカーが知っていたからである。

後者の中小工場の事例で注目すべきは、技術導入のためロボット・メーカーの力をフルに利用していることである。固有技術水準のそれほど高くない実情で新技術に飛びつけばそれ相当の苦勞をしなければならぬということである。そして目標とするロボット活用と自分の技術水準のギャップを外部の力を借りて埋めなければならない。ロボット導入、より一般的には新技術導入ということは、新技術とみずからの既存技術水準との間にあるギャップを埋めるプロセスである。したがってこのような考え方に立てば、ロボットの経済的成否は、導入の企画と実践のプロセス、ならびにその繰返しとの巧拙に大いに関係がある。ロボット導入の経済性は、その導入による変化過程の適切なマネジメント如何で、良くも悪くもなる。従来の経済性評価はこの点にも苦勞なく進むという暗黙の前提がなされている。

このような提案は、具体的にどのように展開されたらよいだろうか。それは、ロボット導入を考える個々の工場の固有技術水準をどのように測ったらよいかという問題に帰着する。(図1参照)

およそ工場は、加工に始まり、組立、保全、現場管理、工程設計、部品設計、製品企画・設計、新技術の開発へとつづく技術の段階をもっている。全段階をカバーする中堅工場、大工場にとっては、各段階の技術の高さが問題となるのに対

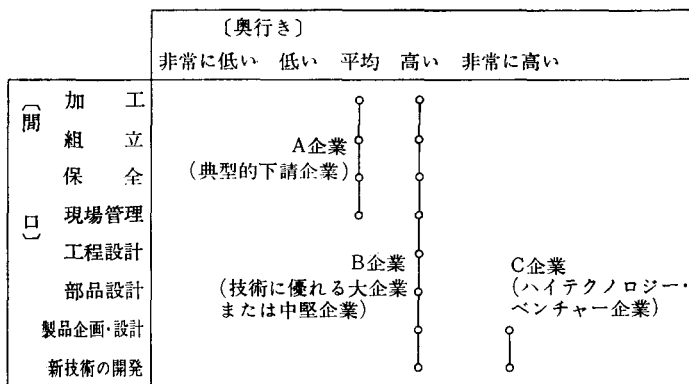


図1 技術のマトリックス

し、一部しかもたない工場にとっては、その保有技術の水準とともに、他の段階との関連が問題となろう。下請工場は、加工、組立、保全、現場管理を磨きながら、親企業の新技術開発、製品、部品、工程の設計に連動して動くことを迫られるだろう。高度の技術開発と製品設計能力をもつ企業は、これを部品設計、工程設計、加工、組立、保全そして管理する企業の工場との関係が大切といえる。ハイテクノロジー、ベンチャービジネスが大企業に製造委託するのがこの場合の例である。

およそ“もの”を造る工場には、みずからの技術の間口と奥行きがある。間口とはすでに述べた加工に始まり、組立、保全、現場管理、工程設計、部品設計、製品企画・設計、新技術の開発を指す。奥行きとは、これら技術の各々における水準の高低である。たとえば加工段階にしても、精度の低い単純加工から、精度のきわめて高い複雑加工までである。ここでのトップ水準は世界的高加工水準である。すべての工場は間口と奥行きのどこかに自分の技術をもっている。その所在をつかむことができると、どんなロボットが保有技術に即応して適切な導入候補機種であるかを定めることが可能である。

間口が狭く、奥行きの浅い技術の工場は比較的使いこなしの容易な簡易ロボットから学習、導入するのが適切であろう。逆に技術の間口が広く、奥行きも深い工場はロボット導入にさいしては、

より高度のロボット導入、活用を狙うべきだろう。そのうえエレクトロニクス技術に特に強ければ、ロボットの自家開発も当然考えられてよい。

ここで提案しているロボット導入に関する評価モデルは、(1) 工場固有の技術水準、(2) 導入もしくは開発しようとするロボットの技術水準、(3) (1)と(2)の差、(4)(1)と(2)の差を埋めるための方法を考える。ここでの経済性発揮は、(3)の埋めるべき技術ギャップの大きさと(4)の技術ギャップを埋める対策如何にかかっている。ギャップが大きすぎるとその対策に時間と金を要するだろうし、ときにはギャップを埋めるのに困難をきわめるだろう。ギャップが小さすぎると、技術成果はほとんどない。(4)のギャップを埋める対策は、自工場内のプロジェクト・チーム、他工場あるいは他企業と協同プロジェクトで導入、活用を進める。そして外部からもっぱら導入する、という3つの方式がある。最後の場合はロボットメーカーの提供する機種の中から適当なロボットを選定し、活用することである。

上の(1)から(4)までの技術ギャップを埋めるプロセスの巧拙は、(1)の蓄積水準自体にも関係がある。ロボットの現場への導入、活用に経験をもつ工場は、経験をもたない工場にくらべてより高いレベル、より大きいと思われるギャップの存在する目標を設定しても、これに対処するノウハウをもち合わせていることが多いだろう。ギャップを埋める能力は、固有技術水準が高ければ高いほど、より高くなると想定することは、むしろ自然である。ロボットの経済性評価も蓄積された技術およびその活用のマネジメントに左右されることが多いように思われる。したがって自社と他社のロボット導入の経済性評価もここで述べたような条件すなわち自社の到達した固有の技術水準(間口と奥行きに関連して)、ロボットの要求する技術水準(間口と奥行きの両方)、これら2つのギャップ(間口と奥行きに関連して)、これを埋める方策について比較可能でなければ厳密にはどちらが経済

的かどうか語ることはできないのである。はじめから無理な高望みはロボットの導入経済性を引下げ、最悪の場合は使いこなせないままとなる。

最近の高級ロボットの実用化プロセスをみるにつけても、ますます現場での活用に関するソフトウェアの体得の必要性は大きくなる傾向にある。このことは新たなる学習、新しい技能体得を強く迫っているようである。つまり技術ギャップを埋める活動は、技術者、技能者、一般作業者の学習、新技能体得の活動である。それは教育訓練プログラムの適切性が必要とされるし、その前提として適格な関係者の存在すること、これらの人の間に強いロボット導入、活用の意欲があることが前提である。これらについての適切なマネジメントが実はロボット導入の経済性を決定する。上にいう意味のマネジメントの適切性が今後ロボットの工場導入の経済性に大いに関係があると筆者は強く感じている。しかもそのマネジメントは、工場内外の固有技術水準の高まりに即応して、つねに適合させるための調節が必要である。まさに経済性は動的に実現するよう努力されなければならない類のものである。

5. む す び

本稿はロボットの経済性評価法がその評価目的に応じて適切に考えられる必要性のあることを明らかにするものであった。またたとえ評価の視点を企業レベルに置いたとしても或いは工場レベルに置いたとしても、経済性評価は決して容易でないことも示した。第3に1つの提案としてロボットの経済性評価がある意味では技術のギャップ・フィリング・プロセス(a gap-filling process)に関係があるとして試論を展開した。ロボット導入の成否はみずからの技術的受け皿(Receptivity)に大いに関係があるし、ギャップを埋める手段選択とその推進にかかっている。この点に注目する経済性評価法があつてよいと考えたのである。