ものづくり現場で重要性を増す 問題発見・解決型熟練*

中馬宏之**

Increasing Importance of Problem Finding & Solving Skilled Workers/Hiroyuki CHUMA

Key words: problem finding & solving skilled workers, integrated knowledge, international competitiveness, craft-type skilled workers, bipolarization

1. はじめに

ものづくりの重要性を指摘する声は数多い。しかし、そのような声の多くには、匠（たくみ）的熟練の重要性を強調する傾向が根強い。ところが、企業の存亡を大きく左右する“経済成果をもたらす革新的な活動”としてのイノベーションに不可欠なのは、この種の匠的熟練だけではない。むしろ、比重としては、論理思考に裏打ちされた“問題発見・解決型熟練”の重要性が高まっている。問題発見・解決型熟練とは、製品やそれらを生み出す生産プロセス自体の不具合の発生を未然に察知して対処したり、発生した原因を迅速に究明・解決できる熟練技能者たちをさす。この種の問題発見・解決作業は、製品やそれらが生み出される生産プロセスに関する的確な知識・経験と、それらを駆使しながら現象面から問題を発生させている真の原因を論理的に絞り込んでいく仮説創造・検定能力がバランスよく備わっていないと、なかなか迅速かつ的確に実行できない。

上記の“問題発見・解決型熟練”の希少性は、IT化・ネットワーク化の急激な進展によって、さらに高まりつつある。ところが、アイロニカルであるが、まさに、このような希少性の急速な増大そのものによって、わが国製造業の競争力の源泉としてのものづくり現場の競争力弱体化傾向が現出してきている。その大きな理由は、問題発見・解決型熟練によって発見・解決されるべき問題自体が相当に高度になりつつあること、その結果、製造現場の担い手中

にそのような問題の高度化についていけない人々が大量に生まれつつあること、にもかかわらず、新たな問題発見・解決型熟練の担い手を効果的に選抜・育成するためのシステムが依然として不在であること、等々に帰することができる。

本論の目的は、上記のようなものづくり現場に同時発生している問題発見・解決型熟練に関する2つの対照的な傾向を、筆者が行った各種のフィールドリサーチに基づいて整理・検討することである。

2. 問題発見・解決型熟練の役割を増大させる要因

2.1 匠的熟練と問題発見・解決型熟練

ものづくりを特徴づける熟練は、匠的熟練と問題発見・解決型熟練とに分類することができる。匠的熟練とは、道具・機械・装置などの限界を極限にまで突きつめた形の加工・組立技能をさす。最近の例でいえば、機械のすりあわせ面をキサゲでミクロン単位の精度に仕上げる技能、“歴史上最も精巧な装置”といわれる半導体露光装置用の投影レンズの非球面を仕上げる研磨技能、研削盤を使わず旋盤だけでミクロン単位の精度を誇るさまざまな機械加工を行う技能等々がそれらにあたる。一方、問題発見・解決型熟練とは、製品やそれらを生み出す生産プロセス自体の不具合の発生原因を、迅速かつ的確に探り当て解決できる技能をさす。この種の問題発見・解決は、製品・生産プロセスに関する的確な知識、それらの知識を統合するための長年の経験、現象面から発生原因を絞り込んでいく論理的推理能力がバランスよく備わっていないと実行できない。特に、三番目の能力、つまりシステム思考ができるか否かが大きな試金石となる。

例えば、最近DVDの売れ行きが好調になってきた。このDVDは、スタンパーと呼ばれる高価な原盤に映像・音声のデジタル信号をサブミクロン単位の幅で刻み込み、それを円筒形の金型に挟み込んで溶融樹脂を射出成形機で流し込み冷却・固化することによって製造される。このスタ

* 原稿受付 平成14年8月21日

** 一橋大学イノベーション研究センター(国立市中2-1)

一橋大学イノベーション研究センター教授&経済産業研究所ファカルティフェロー、経済学博士(Ph. D.)、著書に「もの造りの技能とその形成：自動車産業の職場で」(共著、東洋経済新報社、2001年)など。

ンパー自体は商品ごとに異なっているため、新しいDVDを製造するたびに、スタンパー交換が必要となる。ところが、現在ではかなり生産技術が確立されてきたということであるが、調査した2000年頃には、このような交換のたびに射出成形条件を微妙に調整しないと良品が生み出されない状況であった。スタンパー交換ごとに成形条件の微調整をしなければならない理由は、どのような条件設定をすれば所定の精度をクリアしたDVD製品が生産できるかの再現性が十分に得られていないからである。再現性の確立を阻んでいる要因として考えられるのは、射出成形機のコントロール性能、クリーンルームで電子ビームを使って製造されるスタンパーの出来具合¹、(円筒形をしたスタンパーを包み込む)金型の精度、あるいはそれらの複合要因である。

このような再現性を確保するための条件をなかなか見つけられない局面で発揮されるのが、問題発見・解決型熟練の保有するノウハウである。実際、問題発見・解決型熟練は、材料・素材、スタンパー・金型、射出成形機や付随搬送系ならびにそれらを構成要素とする生産プロセスに関する確かな統合的ノウハウを駆使し、未知のトラブル発生要因に関する確かな“探り”を入れながら根本原因を識別していく。そして、より高度な専門知識を持つ生産・製品技術者と協業しながら、迅速な解決へと導いてくれる。

もちろん、匠的熟練と問題発見・解決型熟練とは、場合によっては不可分である。というのは、匠的熟練でないと、特定の製品不具合の発生要因を容易に類推できないこともあり得るからである。また、たとえそのような類推ができたとしても、不具合自体の克服方法を考案・実行できないこともあり得る。例えば、最近における機械の高精度化・小型化傾向に伴い、部品メーカーは、使用される部品の加工精度向上や、さらなる小型化を要求されることが少なくない。このような要求に対処するには、より小さい部品をより高い面粗度や真円度で加工する必要がある、その結果、場合によっては、加工順序を大幅に変更する必要性がでてくる。というのは、従来の方法では、工作物を切削していく途中でチャッキングが甘くなってしまう場合があるからである。チャッキングが甘くなると、ワーク(工作物)のプレを増幅させるので、ある程度以上の精度が達成できない。匠的旋盤工であれば、このようなときに、加工順序を独自に工夫してチャッキングが甘くならないようにしたり、チャッキング方法そのものを変更したり、精度を出しやすいような治工具を考案したりすることができる。

しかしながら、上記のように匠的熟練と問題発見・解決型熟練とが不可分な形で結びつく傾向は、それほど一般的ではない。むしろ、匠的熟練のデジタル化が加速されていくことによって両者が分離していく傾向が強い。そして、相対的にみれば、製品やそれらを生み出す生産システムの

高度な自動化・複合化・微細化に伴って、後者の重要性が高まりつつある。

2.2 問題発見・解決型熟練の重要性急増の背景

問題発見・解決型熟練の重要性がより高まっている大きな要因の一つは、デジタル化を旨とする急速な技術革新の進展である。実際、問題発見・解決型熟練が担当する作業とは、コンピュータの最も不得意とする統合的な知識・ノウハウを駆使した高度かつ複雑な判断業務である。このような判断業務は、スキル・ノウハウのデジタル化レベルが高度になればなるほど、希少性が增大する。そして、その当然の帰結として、問題発見・解決型熟練の重要性が高まる。また、デジタル化を旨とする急速な技術革新の進展は、最適制御技術やシミュレーション技術の高度化という形で、各種の生産職場において段取り的な作業の軽減・自動化をもたらす。そして、基幹となるライン作業者は、そうして解放された時間を製品の不具合への対応というより本質的な作業に振り向けることを要請されるようになる。

問題発見・解決型熟練の重要性を増大させているもう一つの重要な要因は、製品やそれを支える要素技術の高度化・複合化・システム化・微細化である。製品やそれらを生産する機械・装置の高度化・複合化・システム化・微細化は、一旦それらに不具合が発生したときに、その発生原因を特定・解決することを極めて難しくする。たしかに、このような困難に対処するために、構成部品間の相互干渉ができるだけ少なくなるような形でインタフェースを切り分けてモジュラ化する試みがなされる¹⁾。不具合が発生した場合にどのモジュールに欠陥があるか否かだけを判断し、その部分をごっそり取り替える方式を採用する方法である。

しかしながら、このようなモジュラ化による問題解決方法の簡略化によって、すべての問題が解決されるわけではない。実際、革新的な製品であればあるほど、少なくとも初期段階では設計や量産化技術が未熟であるため、部品間の干渉問題が顕在化しやすい。また、製品やそれらを生み出すための機械・装置の高度化・複合化・システム化・微細化は、解決すべき問題自体の難度や生産プロセスの大局的最適化の必要性を必然的に増大させる。したがって、イノベーションを効率的に実行するためには、卓越した開発設計者や生産技術者のみならず、試作・量産段階でのトラブル発生原因を迅速かつ的確に発見・解決できる問題発見・解決型熟練が不可欠となる。

問題発見・解決型熟練の重要性を増大させている他の重要な要因は、情報技術やネットワーク技術の急速な発達に伴い情報共有コストが急減しているという状況である。このような状況は、“個別企業が潜在的なマーケット需要にいかにか速やかに対応して多くのユーザに受け入れられる新製品を提供できるか”といった要因の重要性を不可避的に高める。この点は、現在では“Time to Market”というキーワードで表現される²⁾。この“Time to Market”を

¹主に、スタンパー上のメッキ粗さ、スタンパーの全体としてのひずみや反りなどの状態を意味する。

短縮するためには、企業内外での同時並行的な情報共有・調整による開発リードタイムの短縮化が不可欠である³⁾。そのためには、問題発見・解決型熟練による新製品立ち上げ段階や量産初期段階での問題発見・解決能力が不可欠となる。加えて、問題発見・解決型熟練にデザインレビュー初期段階、つまり詳細設計図が作成される以前に、生産現場の実態を踏まえて“組み立てやすい、調整しやすい、性能を出しやすい”製品にしていくための貴重な提案をしてもらう必要性も高まる⁴⁾。

3. 問題発見・解決型熟練の出現確率を低下させる要因

前節では、問題発見・解決型熟練の役割を増大させる要因のみを指摘した。しかしながら、製品や生産プロセスのテクノロジー特性によっては、問題発見・解決型熟練の重要性は増大するにもかかわらず、彼らの出現確率を低下させるような要因も出現しつつある。

実際、製品や生産システムが高度になると、解決すべき既知・未知の問題自体がかなり高度になるため、問題発見・解決に必要な知識の要求レベルが格段に高くなる。加えて、抽象度のより高いレベルでの概念操作の必要性が高まるために、問題発見・解決に不可欠な知識の統合化の範囲が拡大する。その結果、問題発見・解決型熟練に対し、製品・生産プロセスに関する統合的な知識のさらなる高度化・広範囲化とより研ぎ澄まされた仮説創造・検定能力とが要請されることになる。さらに、このような傾向は、製造業の中心が従来型の engineering-based industry（実際のものづくりのプロセスから得られる数多くの経験則に依存せざるを得ないために、科学研究の成果・結果が産業に取り込まれるまでの時間が長い産業）から science-based industry（当該時間が短い産業）に移行するにつれてさらに加速する。

上記のような状況が一般的になってくると、これまで問題発見・解決型熟練に任されていた多くの未知の問題発見・解決が、より高度で広範囲な統合的な知識を保有する製品・生産技術者や開発設計者に委ねられていくという現象も起こりうる。つまり、問題発見・解決型熟練の必要性そのものは減少しないものの、その担い手が、現場の作業員から製品・生産技術者や開発設計者に移っていく可能性がある。あるいは、そのような移行が24時間操業などの制約によってなかなか実行できない場合、当該産業の国際競争力の低下すら招来してしまう。以下では、これらの点を例示するために、代表的な science-based industry の例として、最先端半導体生産職場の事例を紹介してみよう。

半導体デバイスの生産職場における問題発見・解決型熟練にとって不可欠な知識とは、大きく分けると装置に関連する知識とプロセスに関する知識の二つである。彼らは、これらの知識を、当初は各種製造装置オペレーターとして、次に、オペレーションの際に発生するさまざまな装置や製品の不具合への対処経験によって学んでいく。

ところが、半導体デバイスの急速な微細化によって、装

置自体が原子・分子レベルでの（量子力学的な）諸現象を操作するまでに高度化してきている。また、半導体デバイス自体も、システム LSI といった各種の半導体デバイス機能を高度に複合化したものが主流となりつつある。このような事情のため、装置とプロセスの双方の領域にまたがって統合的な知識を得ることは、生産労働者にかなり難しくなっている。その結果、この種の職場では、装置・プロセスにまたがる統合的な知識を獲得した少数の問題発見・解決型熟練とその他大勢への二極分化現象が顕著である。

しかしながら、このことは、問題発見・解決型熟練の役割が低下してきているということを意味しない。実態は、その逆である。というのは、半導体メーカでは、70 年代には 35 % に過ぎなかった（平均的な）製造原価に占める装置・設備関連コストが、80 年代半ばに 55 %、90 年代半ばに 65 % と急速に増大しつつあるからである。実際、装置・設備関連コスト比率がこのように製造原価の大半を占めるようになると、高度な製造装置をいかにして限界まで効率的・安定的に使い込めるかが、半導体メーカの競争力を規定する大きな要因となる。

以下では、上記二極分化現象の一端をうかがい知るために、半導体露光装置（Microlithography）を使用する生産職場の例を紹介してみたい。

現在われわれが日常的に目にする各種半導体デバイスは、20～30 層にも及ぶ処理を経てできあがっている。そして、おのおのの層は、特定の回路基板（レチクル）に紫外線を当ててウエハ上に塗布された感光剤（レジスト）に転写・露光される。ただし、同一のウエハ上に露光工程を繰り返して 3 次元の回路構造を作り上げるためには、各層間の重ね合わせが数十ナノメートルの精度でキチンと確保されている必要がある。ところが、この重ね合わせ精度が、さまざまな要因によって乱れてしまうことがある頻度で起こる。以下では、このような重ね合わせ精度にズレが発生したという問題を解決するための問題発見・解決型熟練を紹介する形で、先の二極分化現象の要因を例示してみたい。

重ね合わせ精度のズレが発見されると、そのことが偶然ではないことを確かめるために、まず、該当レイヤーに塗布されていたレジストを洗い流した後に再度新しいレジストを塗布し、先に使用したレチクルで再露光する。そして、そのようにしても同じようなズレが再現されたとすると、合わせズレの発生要因を特定化するために、ウエハ上にマトリックス構造を入れ、ランダムサンプリングして規定数の計測情報を収集する。計測自体には、合わせ検査装置と呼ばれる走査電子顕微鏡が用いられる。そして、そのような計測情報を特定の計算プログラムにかけて、露光装置をオフセット補正するための数個（例えば 5 つ）のパラメータに相当する要因に分解する。

このようにして導出された値が真の補正量を示すのであれば、現場の作業員にとっては、該当する露光装置のオフ

セット値を変更するだけでよい。ところが、ほとんどのケースでは、このような方法では、実際に発生している合わせズレを的確に補正できない。そのため、担当の技能者（あるいは装置エンジニア）が、露光装置の機差を含めたさまざまな要因を勘案しながら、上記5つのパラメータ値を初期条件として巧妙に微調整していかなければならない。しかも、このような微調整の仕方（以下アルゴリズムと呼ぶ）は、担当の熟練者によって少しずつ違うという。聞き取りをした当該職場の組長によれば、このような調整を独りで十分にできるのは、当該職場メンバーの20%ということであった。したがって、かなり高度な作業だと考えられる。

ところが、今や、数多くの半導体生産メーカにおいて、このような合わせズレを補正するためのAPC (Advanced Process Control) という自動制御プログラムが導入されつつある。このAPCは、聞き取りをした職場では、上記の合わせ検査装置による計測情報のみならず、露光装置の機差に関する情報や現在露光しようとしているウエハ上の特定層の3層前までの状態に関する情報をも勘案する形で、自動的に合わせズレ補正を行えるようになっていた。つまり、APCでは、先の問題発見・解決型熟練が保有する各種アルゴリズムでは到底考慮できない情報までも勘案するかたちの合わせズレ補正が、クローズド・ループ型の最適制御プログラムとしてソフトウェア化されている。

上記のような合わせズレ補正がAPCで自動的に行われるようになると、先の20%の問題発見・解決型熟練は、一見不要になってくるように思われる。しかし、そのようなことは、必ずしも真ではない。というのは、合わせズレを発生させる要因によっては、APCが役立たないケースが少なからず存在するからである。実際、APCは、人間業を超えた複雑性への対処が可能であるものの、生産プロセス自体がある種の規則性をもって安定的に繰り返されるような状態でなければ適用可能ではない¹¹。言い換えれば、APCが効果的に適用可能なのは、依然として、ある規則性をもって発生する既知のトラブルにすぎない。未知のトラブルが発生している場合には、依然として、問題発見・解決型熟練（や、より高度な専門知識をもった装置・プロセスエンジニア）によるトラブルシューティングが不可欠になるのである。

ただし、解決すべき問題に未知の問題がより多く含まれるようになるということは、問題発見・解決型熟練にとって、直面すべき問題が以前と比べてより高度になっていくことを意味する。そして、当然の帰結として、従来型の問題発見・解決型熟練が、そのような問題の高度化にキャッ

チャップできる人々とそうでない人々とに二極分化していく。

4. 結びにかえて

従来、わが国製造業の競争力の源泉として、(a)既知・未知の問題発見・解決能力が製造現場で相当に高いこと、(b)そのために技能と技術との相互補完性が十分に発揮されてきたこと、等々が指摘されてきた⁵⁾。ところが、本論でも指摘したように、この点について、わが国におけるさまざまな製造現場において陰りが見え始めている。この点は、先述したscience-based industryにおいて特に顕在化する傾向にある。そして、このような傾向が、さらに、IT化・ネットワーク化の急激な進展によって強まりつつある。また、わが国製造業には、自動車産業のように依然として高い国際競争力を維持している分野と半導体産業のようにかなり国際競争力が低下してきている分野とがあるが、このような産業間における国際競争力の違いは、engineering-based industryとscience-based industryとの違いにほぼ符合している。そして、後者の国際競争力が低下していく傾向は、90年代に、より顕在化してきている⁶⁾。しかも、90年代以降の先進国において、製造業中にしめるscience-based industryの比率が急増してきており、わが国の場合も例外ではない。

そのため、本論の後半部分で言及した傾向が今後も基本的に変化しないとすると、5年あるいは10年という将来スパンで考えた場合、わが国製造業の強さを支えてきたものづくり現場の問題発見・解決型熟練が、それらの重要性がさらに増大していくと予想されるにもかかわらず、相当に弱体化してくる可能性がある。弱体化をもたらすロジックは、繰り返せば以下のようなことになる。

問題発見・解決型熟練にとって、問題解決の際に考慮すべき全体最適化の範囲が相当に拡大する。そのため、問題発見・解決型熟練が最適化の際に考慮すべき各種機能概念の抽象度がより高まる。より抽象度の増した上位の機能概念を操作して最適化を行うためには、より深い専門的能力とより幅広い統合的能力とが不可欠になる。その結果、生産現場での二極分化現象がより顕著になってくる。

上記のような状況を克服して問題発見・解決型熟練の出現確率を上げることは、従来型の人材育成・処遇システムに固執する限りなかなか難しい。というのは、そのようなシステムに固執する限り、最適化の幅と深さが拡大し考慮すべき機能概念の抽象度が上昇している状況にもかかわらず、直面する諸問題の一部分しか考慮できない人々しか生み出せないからである。このような状況を打開するためには、製造部門内や製造部門、生産・製品技術部門間にまたがる各種の機能横断的な部署の新設が不可避となる。そのような部署に属することによって、以前に精通していた機

¹¹例えば、アラインメントマーク上の膜の平坦度がCMP工程によって不規則かつクリティカルに乱れるような事態が発生する場合、そのような不規則性が生み出されるメカニズム特性がハッキリしない限り、たとえ従来型のAPCを適用しても適切な補正ができない。

能概念を包摂する上位概念を意識しつつ問題発見・解決にあたることができるようになるからである。

ただし、他の条件を一定とする限り、当然のことながら、そのような作業を担える問題発見・解決型熟練の出現比率が低下していく。したがって、当該比率を増大させるためには、以前にも増して、人材を的確に選別することが重要となる。そのためには、(a) 各自の“問題発見・解決能力”に応じてより大きな処遇差がつくようにする、(b) 技能者のキャリアの幅と深さをより拡大する、といった形で自己選別機能を強化する必要がある。もちろん、その際には、各種の社内認定・選抜制度ならびに認定・選抜のための透明かつ公平なルールを導入するなどの努力が不可欠である。これらの点に関しては、少なくとも筆者の調査による限り、残念ながら、多くの企業において驚くほど不十分である。

なお、以上は個別企業レベルにおいて望まれる点であるが、当然のことであるが、大局的な視点から教育制度をサイエンス重視の方向に大幅に改変する国家レベルでの人材戦略が望まれる。実際、science-based industry の場合、

engineering-based industry と比べると、高等教育のみならず初等・中等教育、職業教育を含めた一国の教育制度の果たす役割がさらにクリティカルとなる。science-based industry の比重増大が、わが国の産業を支える人々に不可欠な問題発見・解決能力の源を成す各種基礎学力レベルのさらなる向上を要請するためである。

参 考 文 献

- 1) Baldwin and K. Clark : Design Rules : Power of Modularity, Volume 1, MIT Press, (2000).
- 2) Jurgens, U. : New Product Development and Production Networks, Springer, (2000).
- 3) 藤本隆宏, K. クラーク : 製品開発力, ダイヤモンド社 (1993).
- 4) Chuma, H. : "Sources of Machine-tool Industry Leadership in the 1990s: Overlooked Intrafirm Factors," Economic Growth Center Discussion Paper, 2001, No. 837, Yale University, (2001).
- 5) 小池和男, 中馬宏之, 太田聡一 : 『もの造りの技能 : 自動車産業の職場で』, 東洋経済新報社 (2001).
- 6) 長岡貞男 : 「知的財産権とイノベーション」一橋大学イノベーション研究センター編, 『イノベーションマネジメント入門』第12章, 日本経済新聞社 (2001).