

はしがき

品質のつくり込みはばらつきへの挑戦である。生産行為の結果である品質がばらつく背後には、ばらつきの原因があり、そして原因と結果には何らかの因果関係がある。「原因」「結果」「因果関係」へのアクションの取り方を観点として、ばらつき低減のアプローチを体系化する。ばらつき低減のための具体的な解析ステップとして、データ解析を活用した原因の探求と因果関係をつかむ方法を紹介する。最後に、品質のつくり込みについて、課題を含めて思うところを述べる。なお、小論の主要部分は2009年および2010年に上梓した「統計的工程管理」と「開発・設計における“Qの確保”（分担執筆）」、名古屋工業大学が主催する社会人人材育成プログラム「工場長養成塾ゼミテキスト 品質管理」、名古屋工業大学での学部、大学院での講義ノートなどに基づいている。

1. 品質のつくり込み

1.1 経営工学の特質

経営工学科あるいは経営システム工学科の英語の呼称として「Department of Industrial Engineering and Management」が多い。この呼称から、経営工学が対象とするものは二つあると解釈できる。一つはengineeringであり、もう一つはmanagementである。入学間もない1年次の学生に経営工学とは何かを伝えたいとき筆者は図1（「経営」と「工学」の間に漢文で使う返り点をいれて）を示して、「経営工学とは工学を経営する工学です」と説明している。経営工学とは社会にとって高付加価値な成果物を効果的かつ効率的に提供するプロセスの管理技術、および、その管理行為を通じて、プロセスの要素技術の向上を図るための支援技術であり、engineeringを対象とする経営工学は「ものづくりのためのマネジメント」である。一方、managementを対象としたとき、経営工学は経営の要素である人、金、もの、情報のリソースを活かすためのしくみの創造・設計・運営・評価・改善に対する実証的なアプローチを提供するものであり、いわゆる「マネジメントのための科学的アプローチ」である。経営工学の伝統的な分野はこの二面性を有している。例えば、筆者が専門とする品質管理では、SQC (statistical quality control) や品質工学はengineeringを対象とし、品質保証を中核としたマネジメントであるTQM (total quality management) はmanagementを対象としている。



図1 経営工学とは

経営工学の歴史を紐解いてみると、その対象がものづくりから社会システムを含む経営事業体のマネジメントに拡大したと言ってよいであろう。その背景には、ものづくりのマネジメントは対象が成果である「もの」の管理ではなく、ものづくりの「プロセス」の管理であったことがある。ものづくりのプロセスはしくみであり、そのしくみをマネジメントするためには経営事業体のマネジメントも絡んでくる。また、マネジメントの考え方はものづくりであっても経営事業体であっても、共通の要素を含んでいる。このような経営工学の特質がその対象を「もの」から「経営事業体」に拡大してきたと考えられる。

吉川 (2001) は工学の目的として「工学の目的は対象についての真実を明らかにするだけではなく、さらに良いものを作るということであり、この方が主要な目的である」と述べている。また、工学には「作るという過程は独立した行為ではなく、使うという行為と組みになって初めて一つの独立な系を構成するという本質的な構造がある」とも述べている。良い悪いを判断するのは、それを使う人である。吉川による工学の目的に照らし合わせるならば、経営工学が対象とするものは前述した「ものづくりのプロセス」であり、「経営事業体をマネジメントするしくみ」であり、さらに良い悪いを判断する「使い手」が加わる。「使い手」が対象であるのは工学に共通であるが、経営工学では「使い手」を「顧客」あるいは「市場」としてものづくりのプロセスの一つの要素として位置づけるところに特徴がある。

1.2 品質管理とは

次に、品質とは何か、また、品質管理とは何かを考えてみたい。

品質、コスト、納期 (QCD) は生産行為による成果が有する価値の3要素と言われている。品質は「生産行為による成果がもつ価値

の「要素」である。誰にとつての価値かという「顧客」にとつての価値である。例えば、B2C (business to consumer) 企業にとつて顧客は市場であり、設計にとつて顧客は製造であり、また、製造ラインのある要素工程にとつて顧客は次工程以降の要素工程である。すなわち、顧客とはものづくりのプロセスにおける後工程である。後工程にとつて「価値のあるもの」を提供するために品質管理が貢献できるのは「品質をつくり込むプロセスをマネジメントすることによって、後工程に約束した品質を保証することである」また「品質をつくりこむプロセスをマネジメントするためのしきみを構築する」ことである。

品質管理の目的は「品質を管理する」ことではなく「品質を後工程に保証する」ことである。それを実現するために「品質をつくりこむプロセスを管理する」ことである。ちなみに、品質をつくり込むプロセスは顧客には見えない。そこで、そのプロセスがあるレベルを満足していることを顧客に示すしきみの一つがISO 9001による認証制度である。飯塚 (1995) はISO 9001は「品質マネジメントシステムのショーウィンドウ化」であると述べている。

さて、後工程は品質のよし悪しをどのように評価するのであろうか。

1979年4月17日朝日新聞に日本のものづくりの強さを特集した記事が掲載された。1980年代といえば、自動車、電化製品などの日本製品がアメリカ市場でのシェアを著しく伸ばした時期である。1980年には“*If Japan can, why can't we?*”が米国NBC放送で放映され、日本の品質管理活動がベンチマークとして欧米企業からキャッチアップの対象となった。「追いつけ追い越せ」の時代のターニングポイントとなった時期である。

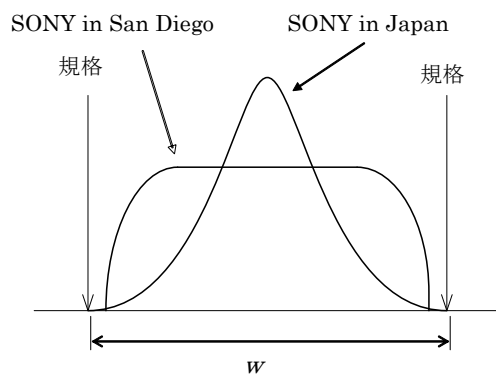


図2 SONY日本工場とSONY San Diego工場の違い (朝日新聞 1979年4月17日)

上記の記事の中に図2が掲載された。図2は、San DiegoのSONY工場と日本のSONY工場で製造されたテレビのある特性を分布によって表現したものである。どちらの工場も規格外のものはほとんどない。記事には、二つの分布の違いが当時の日米製造業の品質レベルの差の一因であることが記されている。

日本では作業標準を遵守し、特性値が目標値と一致するように作業が行われる。しかし、特性への寄与は小さいが、制御できない多くの要因によって特性はばらつきをもつ。結果として、図2に示すように、特性の分布は正規分布に近似できるものとなる。一方、San Diego工場では規格を外れさえしなければよいという意識で作業が行われていた。その結果、特性はいくつかの分布の混合分布となる。日本製の正規分布に対して、多少強引ではあるがSan Diegoの場合の分布に一樣分布を仮定する。それぞれの分布の標準偏差を σ_{jp} , σ_{san} , 許容差を W とすると、

$$\sigma_{jp} = \frac{W}{6} \quad (1)$$

$$\sigma_{san} = \frac{W}{2\sqrt{3}} (> \sigma_{jp}) \quad (2)$$

となる (Taguchi (1993)). (1)式と(2)式の比較は、日本製の品質がアメリカ製より優っている事実をばらつきの大きさを評価できることを例証するものである。すなわち、後工程に対する品質のよし悪しは品質特性のばらつきの大きさを計量する。

品質がもつ価値は後工程に対してだけではない。併せて「自工程」に対して提供する価値を有する。品質は生産行為の結果であり、「結果である品質は、品質をつくり込んだプロセスの健全さを判断し、かつ、評価する情報をもっている」という価値である。品質を作り込んだプロセスの能力を計量する概念に工程能力がある。工程能力は結果である品質特性のばらつき (標準偏差) によって計量する。

品質はコスト、納期とは異なる側面をもつ。コストと納期が、製品が顧客の手にわたるまでの価値概念であるのに対して、品質は顧客の手にわたってからの価値概念も含む。要するに、出荷時の品質検査で合格であっても、それだけでは顧客に品質を保証したことにはならない。

製品が顧客の手にわたってからを考えてみよう。顧客が製品を使用する環境はばらつく。したがって、使用環境のばらつき (外乱) が原因となって、作り手から顧客への名義的約束である機能はばらついてしまう。また、製品を構成する部品は時間とともに必ず劣化する。高価な部品であれば機能のばらつきが小さく安定しているが、それでも劣化は起こる。劣化が遅いだけである。部品の劣化 (内

乱) が原因となり、製品の性能はやはりばらついてしまう。もっと厄介なことに、品質評価は顧客の主観的判断によってばらついてしまう。図3に示すように、市場に出るまでのばらつきは図面で与えられた目標値からの乖離であり、これは市場に出るまでに評価することができる。しかし、製品が市場に出た後は使用環境の外乱、製品を構成する部品の劣化によってばらつく。さらに、目標値そのものが顧客一人ひとりの主観によって評価される。そもそも、気に入らなければ選択しない。

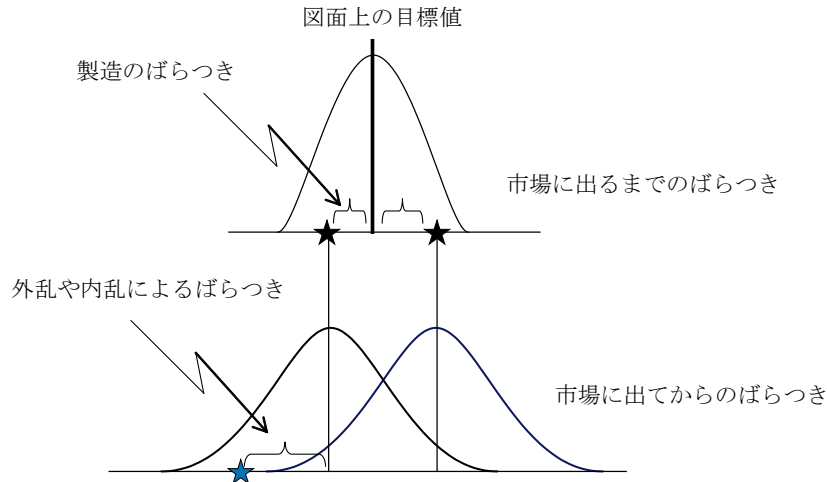


図3 市場に出るまでのばらつきと市場に出てからのばらつき

以上のように、製品が顧客の手にわたってから、品質はばらつきをもつ。しかし、その原因は何かといえば、作り手が制御できないもの、すなわち、原因に対してアクションをとることができないものが多いことに気づく。作り手は、このように厄介な特性を持つ品質を、ものづくりのプロセスを通じてつくり込まなければならない。表1は狩野(2005)を参考に、B2C企業が顧客に保証すべき品質要素をまとめたものである。表1に示した品質要素をつくり込み、顧客に保証するためには、ものづくりのプロセスのすべての部門(企画・開発、設計、製造)が品質のつくり込みに務めなければならない。

表1 顧客に保証する品質要素

品質要素	説明	品質要素の例
製品企画	顧客への名義的約束	基本機能、付加機能、性能
再現性	約束の時間的および空間的再現	信頼性、頑健性
効率性	約束を実現させるための顧客側の代償	経済性、設置性、弊害機能
倫理性	遵守すべき約束	社会性、安全性、環境性
支援性	約束を実現するためのサポート	使用性、保全性、アフターサービス
感性品質	感性への訴求	デザイン、ブランド

大まかに言うと、ものづくりのプロセスは企画、設計、製造から成る。企画段階では「誰に何を売るか(商品企画)」「グレードをどうするか(製品企画)」を決める。企画という生産行為は市場の声を製品の機能とグレード(製品企画)に変換することである。設計は、企画からの出力を「図面」に変換する生産行為であり、製造は「図面」を「製品」に変換する生産行為である。各段階での出力に対する品質をそれぞれ「企画品質」「設計品質」「製造品質」とよぶ。

企画品質がばらつくとは、企画の成果である製品企画に対して顧客の評価がばらつくことである。企画品質のばらつきの原因は顧客にあり、ばらつきは主観軸上のものである。作り手は、ばらつきの原因である顧客に対して、製品がもつ品質への認知度を高めるアクションをとることによって、ばらつきを減らす戦略をとる。しかし、主観的なものに起因する以上、その効果には限界がある。そこで顧客の要求に応じたマーケットセグメンテーション、あるいは徹底したカスタマイズが対応策となる。

設計のアウトプットは図面情報である。図面情報はばらつかない。図面どおりの製品を顧客が使用したときばらつくのは、部品の劣化や使用環境の違いを原因とした品質要素である。例えば、顧客の手にわたってから、顧客に対して名義的に約束した品質要素が時間的に再現するか(信頼性)、また、空間的に再現するか(頑健性)を意味する品質要素である再現性は、設計によるつくり込みの役割が大きい。図3に示した、外乱や内乱による市場に出てからのばらつきである。このばらつきは時間軸上と空間軸上でのものである。作り手は、ばらつきの原因である部品の劣化をできるだけ抑えることはできても、止めることはできない。また、顧客に対して使用環

境を制限することもできない。そこで、原因がばらついていても結果である品質がばらつかない対応策をとらなければならない。

設計のアウトプットを授かるのは顧客だけではない。製造も設計のお客様である。製造は設計に対して「つくり易さ」「異常の発見し易さ」を求める。これを設計の製造性 (Design For Manufacturing) とよび、設計が製造に対して担うべき設計品質である。

製造のアウトプットは製品 (要素工程であれば仕掛品) である。生産工程を構成する要素は材料 (Material), 設備 (Machine), オペレータ (Man), 加工方法 (Method), 計測 (Measurement), 環境 (Environment) の5M1Eからなる。前述の設計の製造性は、加工方法 (Method) に含まれる。5M1Eが原因となり、製造品質である品質特性がばらつく。一企業での一貫生産でなければ外部要因も増えるが、5M1Eのほとんどは内部要因である。すなわち、図3の市場に出るまでのばらつきである。

小論のタイトルにあるように、品質のつくり込みはばらつきへの挑戦であり、品質管理とは、そのためのマネジメント行為の体系である。

2. ばらつき低減の体系化

2.1 ばらつき低減のための4つのアプローチ

前述したように、作り手は企画から製造に至るものづくりのプロセスのなかで品質を作り込んでいる。どのプロセスであっても品質の向上は成果のばらつき低減である。ここでは、ばらつき低減のためのアプローチの体系化を試みる。体系化は現状のアプローチの評価や見直し、ばらつき低減の方法についての気づきを得ることに役立つ。

結果がばらつく背後にはその原因および原因と結果の因果関係がある。すなわち、結果のばらつきの構造は、原因と結果とその因果関係からなる。体系化した4つのアプローチは

アプローチA：結果にアクションをとる

アプローチB：原因にアクションをとる

アプローチC：原因の状況をみて結果にアクションをとる

アプローチD：因果関係にアクションをとる

である (図4参照)。立林(2004)は、ばらつきを抑えるアプローチとして

- ①ノイズの発見と除去
- ②出力の補正
- ③ノイズの影響の減衰

を上げている。上記の4つのアプローチの内容は、立林の解説とほぼ同じ (アプローチBは①、アプローチDは③に対応) である。ただし、アクションをとる対象、および、アクションの取り方に着目することによる修正を加えている。具体的には、立林の3つのアプローチのうち、②出力の補正をアプローチAとアプローチCに分類する。

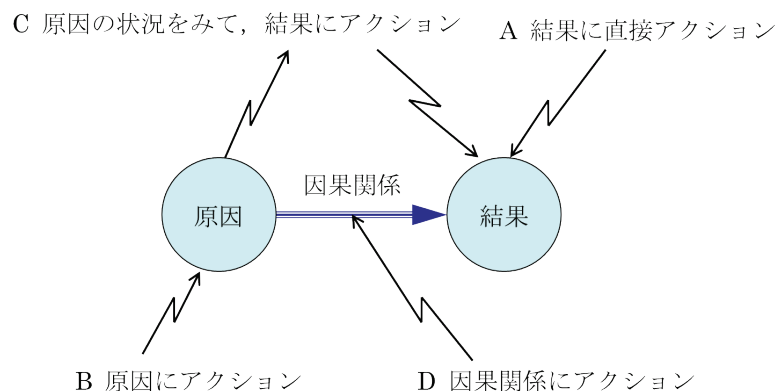


図4 ばらつき低減のための4つのアプローチ (仁科 (2009))

図5～図9に示すように、結果のばらつきの構造にシンプルなモデルを仮定し、以下に4つのアプローチを解説する。

アプローチA (図5)：結果にアクション

アプローチAは流出防止のアプローチである。原因には一切手を打たない。同じアクションを何度も繰り返すことになる。「不良を流さない」しくみの発想はこのアプローチである。

アクションの取り方によって、アプローチAをさらに分類するならば、規格外の製品を「選別」するアクションと、直前の加工結果をみて次の加工を「調整」するアクションに分類できる。前者の具体例は全数検査やエラープルーフである。後者はフィードバック制御である。アプローチAを行うにあたって、結果の状態をタイムリーに、かつ、要求される精度で計測できることが条件となる。同時

に、「選別」行為、あるいは「調整」行為に対して高い確度が要求される。アプローチAによるアクションは工程に組み込まれており（インライン、あるいはオンライン）、標準化されている。アプローチAの「選別」を実施するには工数がかかる。したがって、自動化が期待される。「調整」には調整コストが発生する場合がある。調整行為が高度化したシステムとして、切削加工におけるインプロセス計測による終点検出がある。加工しながら寸法計測を行い、加工終点を制御することによってばらつきを低減させるものである。

「調整」は「選別」とは異なり、予測という行為が含まれる。例えば、フィードバック制御は、加工後の結果から次の加工結果を予測する。調整変数の値を変えることによって予測値と目標値との差を補正する。調整変数の値を変える（「変わる」のではない）アクションである。したがって、調整変数と結果との関係を維持管理することが不可欠となる。

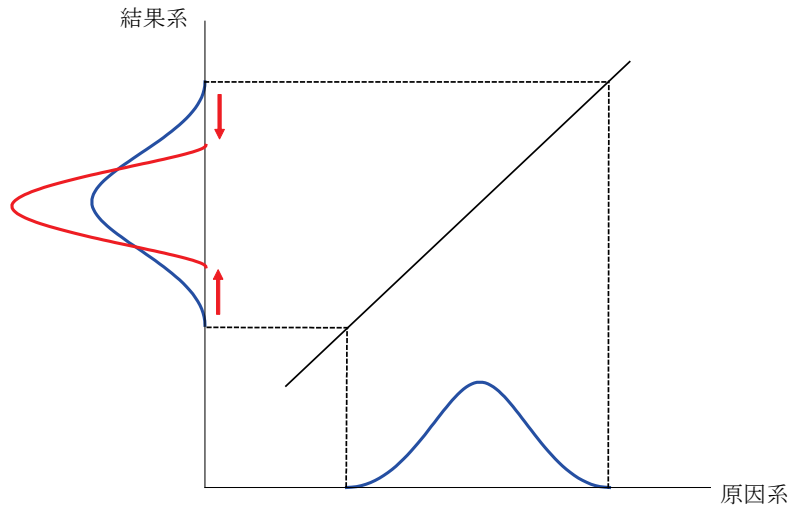


図5 ばらつきを抑えるアプローチ（アプローチA）（仁科（2009））

アプローチB（図6）：原因にアクション

アプローチBは再発防止のアプローチである。結果をばらつかせている原因を突き止め、その原因のばらつきを抑えることによって結果のばらつきを抑えるアプローチである。

前述したように、製造品質のばらつき要因は工程の5M1Eであり、ばらつきの原因を抽出することによって、多くのケースでは原因にアクションをとることができる。このとき種々のQC手法がばらつきの原因を突き止めるために活用される。原因を探ることは同時にばらつきのメカニズムを探ることであり、このことは製造技術のノウハウの蓄積につながる。また、現場の改善力の向上にもつながる。我が国の製造業が得意とするアプローチである。

設計品質のばらつきを抑えるためにも、このアプローチは利用される。例えば、部品劣化による設計品質のばらつきを抑えるために、できるだけ劣化しにくい部品を採用する方法がこのアプローチに相当する。

しかし、原因のばらつきを抑えるためにはコストがかかる。費用対効果を考慮し、たとえ原因が分かっていたとしても他のアプローチ（例えばアプローチA）を採用することもある。例えば、半導体製造工程の酸化膜生成工程では、気圧の低下が酸化膜厚のばらつきの原因となる。しかし、気圧に対してアクションをとるには莫大な設備が必要である。そこで、成膜時間を調整変数としたアプローチAをとる。

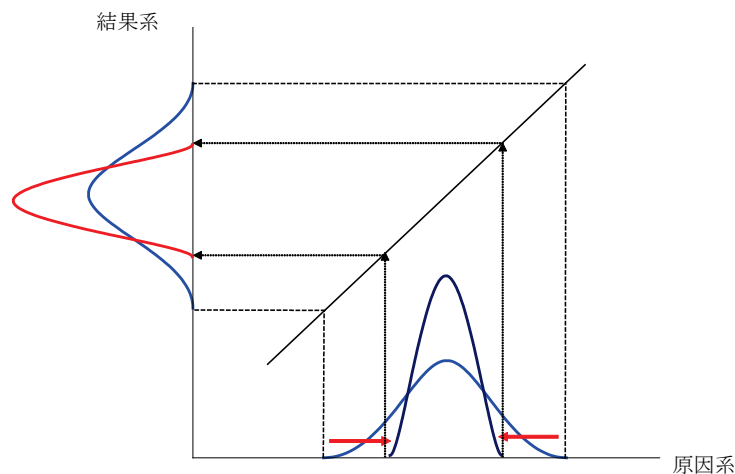


図6 ばらつきを抑えるアプローチ（アプローチB）（仁科（2009））

原因のばらつきを抑えるのではなく、原因系の平均値を変えるアプローチも考えられる。図7に示すように、規格値が片側（下側）のみの場合、原因の分布の平均値を上げることによって、結果のばらつきを抑えるのではなく、結果の平均値を移動させ不良率を下げる。ただし、このアプローチはコスト高になるケースが多い。また、元々、結果のばらつきが小さいことが前提となる。ばらつきが大きいと、それだけ平均値の移動量を大きくしないと対応できない。アプローチBによってばらつきの低減がなされていることを前提とするアプローチである。

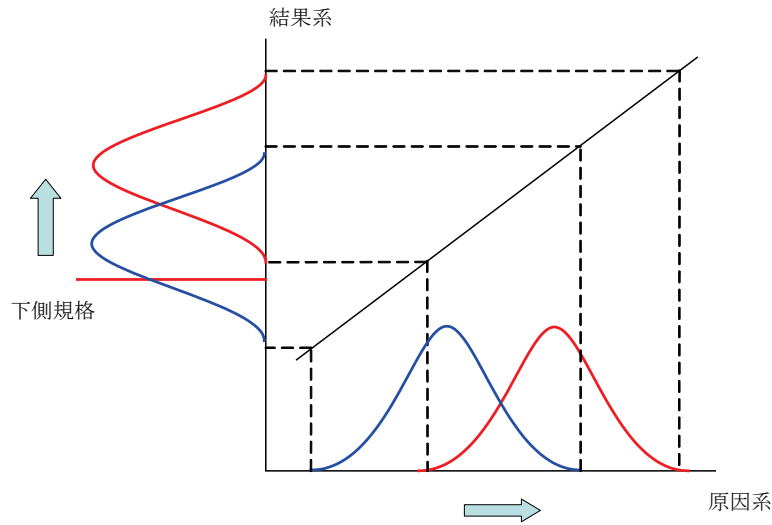


図7 原因系の平均値を変えるアプローチ（仁科（2009））

アプローチC(図8)：原因の状況を見て結果にアクション

アプローチCは適応的未然防止のアプローチである。原因の状況を見て（図8では原因がa, bあるいはcの状態であることを前もって知り）結果を調整する（結果の分布の平均をそれぞれa, bあるいはcにシフトさせる）方法である。

典型的な例がフィードフォワード制御である。例えば、焼き入れ工程において、材料のカーボン量がJISの許容範囲内でばらついているとする。カーボン量のばらつきが主原因で焼き入れ硬度がばらつく。このとき、材料のカーボン量を事前に知ることによって焼き入れ温度を調整し、硬度のばらつきを抑える。自動車ボディのスポット溶接において、板厚によって溶接電流の初期値や電極の摩擦に対応した電流値のステップパターンを変えるのもアプローチCの例である。「相手（原因の状態）によって手を替える（圓川、宮川（1992））」方法である。

このアプローチの成否は、原因系の情報を如何に精度よく、かつ、タイムリーに知ることができるかに依る。また、結果系の平均値を容易に調整できる変数（調整変数）の存在が必要となる。ただし、調整コストを考慮しなければならない。

しかし、アプローチCでは原因には手を打たず結果系の平均値を調整しているので、原因系の情報の精度の粗さから生じる結果のばらつきは残る。一方では、原因系の情報の高精度を確保した調整によって、結果のばらつきを極端に小さくすることが可能である。

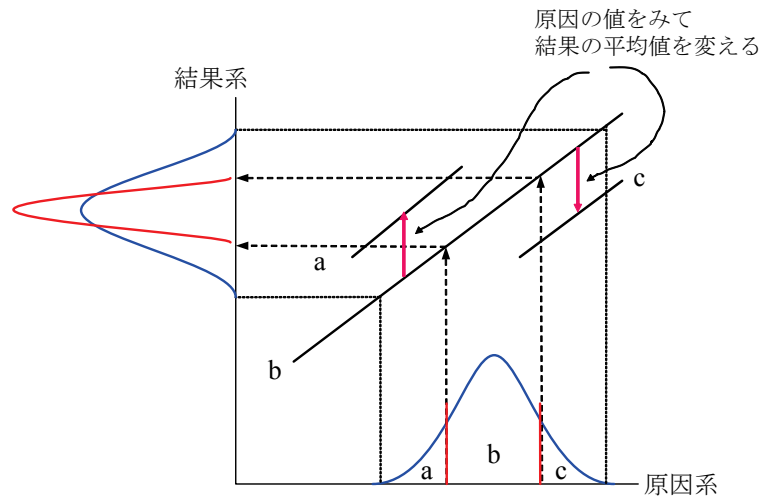


図8 ばらつきを抑えるアプローチ（アプローチC）（仁科（2009））

アプローチD (図9) : 因果関係にアクション

アプローチDは未然防止のアプローチである。原因がばらつくことによる結果への影響を緩和させるアクションをとる。原因の影響を緩和させるためには、図9に示したように線形関係の傾きを変える条件、すなわち、原因の変化が敏感に効かないような条件を探すことになる。このアプローチは設計段階で有用なアプローチであり、“ロバスト設計 (または、パラメータ設計)” とよばれる (例えば、立林 (2004))。

アプローチDは非線形性を利用する方法と交互作用を利用する方法がある。2つの方法の例を以下に示す。非線形性の利用は、原因が対象の内部にある場合 (内乱) である。半導体フォトレジスト工程の品質特性であるレジスト寸法 y_2 は前工程の結果であるレジスト膜厚 y_1 の影響を受けてばらつく。レジスト膜厚 y_1 とレジスト寸法 y_2 の関係を調べたところ、図10のような関係が見いだせた。レジスト膜厚 y_1 は前工程の結果であり、ある程度のばらつきはやむを得ない。そこで、前工程の特性であるレジスト膜厚 y_1 の目標値を図10に示した y_1^* に設定した。この方法におけるアクションの取り方は、図7に示した「原因の平均値を変えるアプローチ」と同じである。しかし、ねらっている効果が異なる。非線形性を利用したアプローチDが特性に対する原因の効き方を変えることをねらったアクションであるのに対して、図7のアプローチは原因の効き方を変えることをねらったものではない。

交互作用の利用は、特性に対する原因の効き方を変えるために、原因とは別の要因にアクションをとる方法である。要因 (因子G) のばらつきが原因によって特性がばらつき、不良の発生にもつながることが判明した。しかし、その要因のばらつきにはアクションがとれない、もしくは、アクションをとるためには大きなコストがかかる場合を想定しよう。その要因 (因子G) と、特性に対する交互作用をもつ因子Aを探し、因子Gが特性のばらつきに与える影響を緩和させる因子Aの条件出しを行う。その例を図11に示す。因子Aの現状がA1水準である。因子AをA2水準にすることによって、因子Gによる特性のばらつきを抑えることができる。

アプローチDは、原因のばらつきを小さくするアクションをとらないので、原因の制御が不可能な場合に有効である。また、結果や原因に対してアクションをとるアプローチA、Bや調整を必要とするアプローチCと比較してアクションに費やすコストは低い。

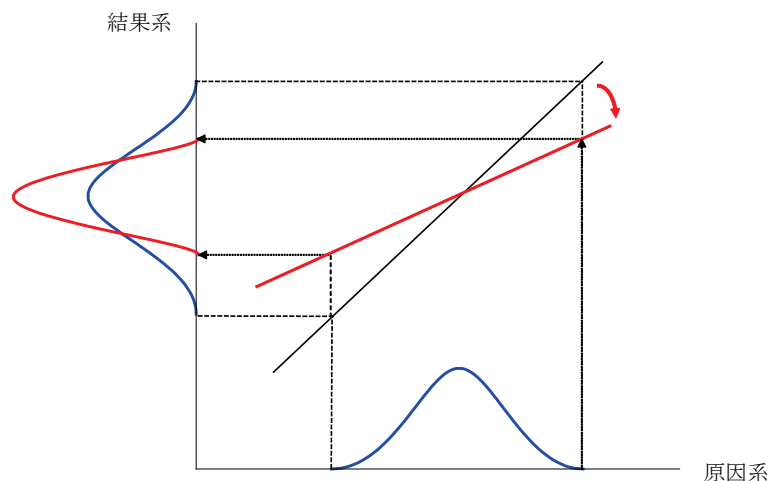


図9 ばらつきを抑えるアプローチ (アプローチD) (仁科 (2009))

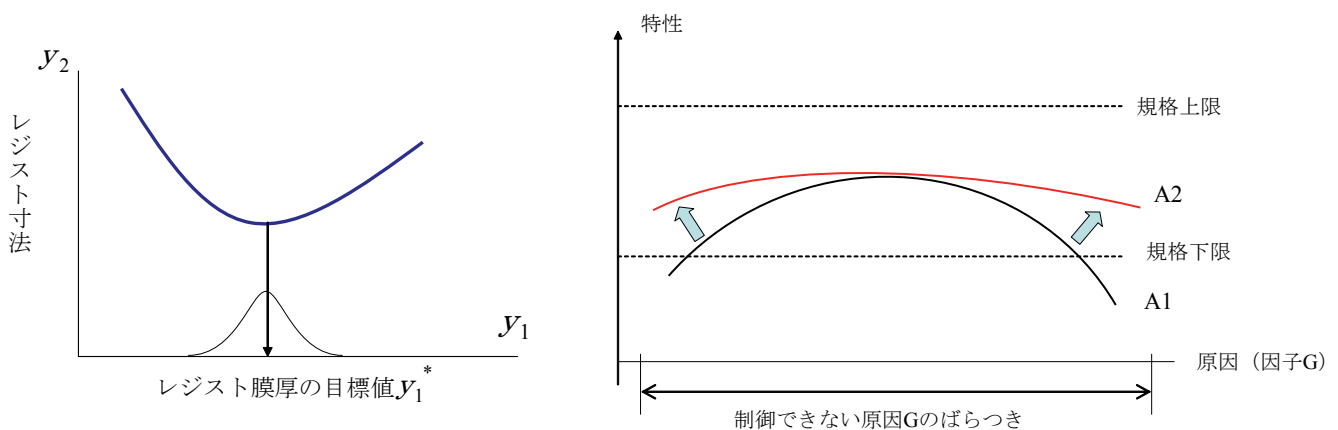


図10 アプローチDの例 (半導体フォトレジスト工程) (仁科 (2009))

図11 アプローチDの例 (交互作用の利用) (仁科 (2009))

2.2 4つのアプローチの活用

表2に示すように、作り手は4つのアプローチを駆使して企画品質、設計品質、製造品質のばらつきを抑える生産行為を行っている。

表2 ばらつき低減のための4つのアプローチの活用

アプローチ 対象とする品質	A 結果にアクション	B 原因にアクション	C 原因の状況のみで 結果にアクション	D 因果関係に アクション
企画品質		○	○	
設計品質		○	○	○
製造品質	○	○	○	○

企画品質をばらつかせる原因は顧客である。広告活動によって商品の認知を高めることによるアクションは原因である顧客を対象としているのでアプローチBである。顧客のロイヤリティを高めるブランド戦略もアプローチBに相当する。一方、マーケティング戦略の一つにマーケットセグメンテーションがある。これは、原因である顧客をよく観察することによって市場をセグメントし、各セグメントに別々の商品を充てる（あるいは、ニッチな市場をねらう）ことであり、アプローチCに相当する。

前述したように、設計品質は製造と市場で評価される。対市場の設計品質のばらつきを抑えるには、まずアプローチDを行うことが有効である（立林（2004））。ばらつきの原因が市場環境である場合、原因には手が打てないからである。ばらつきの原因が部品の劣化や製造上のばらつきである場合は、アプローチDを補う次の手として、精度の高い部品や劣化しにくい部品を用いるなど、コスト高を犠牲にしたアプローチBを採用する。あるいは、環境に対処する特別仕様（例えば、寒冷地仕様）とするのであれば、アプローチCを採用したことになる。これらの例からも、アプローチDに比べてアプローチBやアプローチCがコスト高になることが理解できる。

対製造の設計品質のばらつきを抑えるには、対市場の場合と同様に、まずアプローチDが有効である。例えば、作業者の熟練度や作業環境が原因であっても、設計部門は手が打てない。一方、設計部門の業務ではないが、作業者への教育訓練はアプローチBになる。同様に作業環境などの整備もアプローチBである。これらは詳細設計段階でのレザインレビューにおいて設計部門と製造部門との摺り合わせが必要なアクションである。

製造品質のばらつきを抑えるには、4つのアプローチをすべて用いる。製造は製造ラインを早期に「いつもの状態」が「維持したい状態」になるようにマネジメントを行う。これは一朝一夕には行かない。一般的には、流動準備期、試験流動期、初期流動期を経て、維持管理すべき工程の状態である量産流動期となる。この過程で4つのアプローチを駆使する。流動準備期では未然防止のためにアプローチDを、試験流動期ではアプローチAとCの標準化、初期流動期では改善・標準の見直しのためにアプローチBを、量産流動期では維持管理のためにアプローチAとCの維持管理が必要である。

3. データ解析を用いた因果モデルの構築とその応用例

3.1 相関と因果

2節に述べたばらつき減らしのための4つのアプローチのうち、アプローチCとDは原因に対してアクションをとるわけではない。しかし、「原因」が何かをつかんでおかなければならない。アプローチBは「原因」を追求することが本質であるし、「原因」に対してアクションをとるためには、また、効果をつかむためには原因と結果の因果関係も把握しておく必要がある。

我が国の品質管理活動の特徴に「事実による管理」がある。データという事実による管理活動である。そのベースには、データ解析の方法論があり、統計的品質管理（Statistical Quality Control : SQC）として従来から技術者向けの教育が行われてきた。データ解析とは、データの獲得、データの解析、解析結果の解釈、アクションの提案というデータを活用した問題解決のための方法である。ただし、データという事実のみで原因や因果関係の探求はできない。そこには技術的な知見が不可欠であることは言うまでもない。

データを取る方法は二通りある。「観察する」か「実験する」かである（例えば、宮川（2008））。観察することによってデータを取るとは、あるがままの現象をデータとして取ることであり、そのデータを「観察データ」とよぶ。一方、実験することによってデータを取るとは、原因系の変数（因子）を意図的に振って（水準を設定して）その結果（応答）を得ることであり、そのデータを「計画データ」とよぶ。原因を探ることが目的の場合、データは観察データであることが多い。何となれば、原因を探るための実験は実験サイズが大きくなり、現実的ではない。まず、現象を観察することから始めるのが妥当である。いわゆる犯人を捜す探偵の立場での解析である。

原因を探るための観察データの取り方と解析の要点について述べる。原因を探るためには、現象を観察し、データを取り、データの挙動を可視化し、そこから気づきをえて、その気づきを説明できる仮説を生成する。容易に、しかも、多くの気づきを得るためのデータを取るポイントは、比較ができるデータを取ることであり。比較することによってその違いから気づきを得るのである。比較の視点には、時間、空間、履歴がある。時間による比較とは昨日と今日を比較する、去年と今年を比較するといった時系列データがその典型である。空間による比較とは、場所による違い、形による違いをみるといったデータである。理想的には、結果の履歴をトレースした

データが欲しい。工程の5M1Eの情報がトレースできると、サンプル×変数の多変量データを得ることができる。

解析結果をアクションにつなげるためには対象とした工程のアウトプットにつながるメカニズムをモデル化することが必要である。変数間の因果関係をつかむことである。あるがまま観察データから因果をつかむポイントは「相関の背後にある因果の抽出」である。

図12は47都道府県のある年の犯罪発生件数とコンビニエンスストア（以下、コンビニ）の店舗数を散布図で示したものである。散布図を書くということは、ある変数の値によって別の変数の挙動を比較することになる。図12は、どちらの分布も右裾が重いので対数変換を施している。相関係数は0.916であり、高い正の相関が認められる。散布図と相関係数の計算から、高い正の相関関係あるという挙動に気づきを得たのである。さて、この挙動を説明できる仮説を生成する。仮説Aとして

仮説A：コンビニは犯罪の原因の一つである。

を立てたとする。確かに仮説Aが正しいならばコンビニ店舗数と犯罪件数の関係は図12のようになる。しかし、別の仮説（仮説B）

仮説B：コンビニ店舗数と犯罪件数には共通の原因（人口）がある、

も図12の挙動を説明できる。

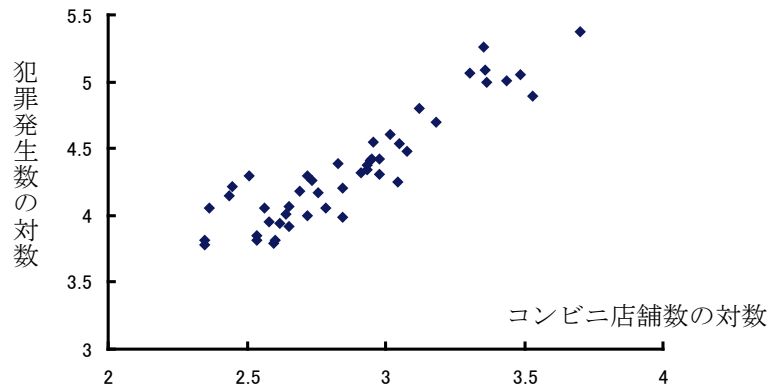


図12 47都道府県におけるある年の犯罪発生件数とコンビニ店舗数

ちなみに、統計的な判断によれば、仮説Aは棄てられ、仮説Bは棄てられない。例えば、次のような回帰分析における変数選択がそれを裏付ける。

$$\text{犯罪件数} = 1.06 + \frac{1.14}{(F=234.9)} \text{コンビニ数} \quad (3)$$

$$\text{犯罪件数} = -3.99 - \frac{0.06}{(F=0.191)} \text{コンビニ数} + \frac{1.35}{(F=89.17)} \text{人口} \quad (4)$$

(3)式から(4)式にモデルを変更すること、すなわち、説明変数に人口を加えることが、コンビニ店舗数からみると何を意味するかについてきちんと理解していないと回帰分析の解析結果をミスリーディングしてしまう。これは、コンビニ店舗数からみると「人口を固定する」、すなわち、「人口がある値になることを観察したこと条件とする」あるいは「人口で層別して観察する」ことを意味する（例えば、仁科、永田（2002））。変数間の関係（パス）で表現するならば、(3)式から(4)式の回帰モデルにすることは、コンビニ店舗数から人口を経由して犯罪件数に辿り着くパスを閉じたことになる。人口を経由する道を閉ざされたとしてもなおかつコンビニ店舗数と犯罪件数の間にパスがあるならば、仮説Aの棄却を疑ってもよい。

この例は3変数による簡単なものであったが、変数が多くなると因果モデルにまで到達するのは簡単ではない。前述したように、統計的な判断のみでは因果モデルの構築はできない。仮説の世界と事実（データ）による解析結果の世界とのキャッチボールを繰り返すことによって、モデルをより精緻なものにしていく地道な試行錯誤の手順が必要である（図13参照）。解析結果を提示しながらグループディスカッションができるとよい。探索的に因果モデルを構築した事例として、仁科、入倉、藤原（1997）と亀谷、仁科（2011）などがある。

3.2 回帰分析の活用事例

ここで、回帰分析の醍醐味について触れておきたい。次の事例は仁科、永田（2002）に紹介されたものである。

メッキ工程の品質特性の一つは光沢度である。光沢度を上げるためには電流密度を下げたほうがよい。しかし、電流密度を上げたほうが生産性は上がる。すなわち、品質と生産性はトレードオフの関係にある。品質を下げずに生産性を向上させたい。

解析の対象とした変数は、原因系としてメッキ液の電流密度 x_1 （以下、電流密度）、電解液温度 x_2 、および結果系としてメッキ光沢度 y_1 と生産性（メッキ時間） y_2 である。データの相関係数行列を表3に示す。解析前の事前情報として、図14の因果ダイアグラムがある。図14の因果ダイアグラムの妥当性を検討する。

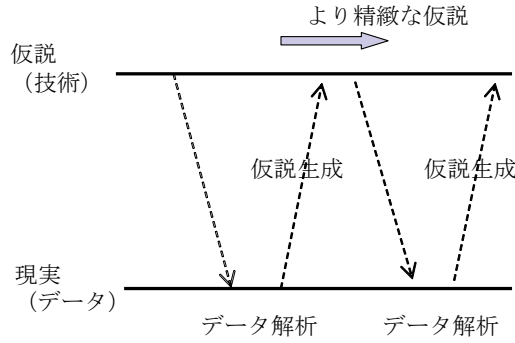


図13 仮説生成のプロセス (司馬 (1987) を参考に作成)

表3 メッキ工程の相関係数行列 (仁科 (2009))

	電流密度 x_1	電解液 温度 x_2	メッキ 光沢度 y_1	生産性 y_2
電流密度	1.000			
電解液温度	0.907	1.000		
メッキ光沢度	-0.858	-0.888	1.000	
生産性	0.940	0.884	-0.829	1.000

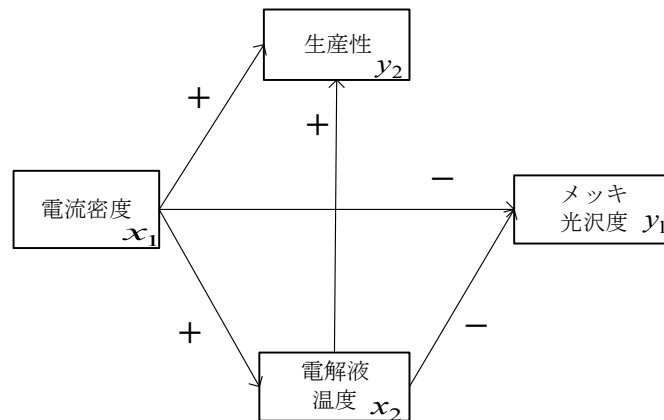


図14 メッキ工程の因果ダイアグラム(事前情報)

まず、原因系の二つの変数間には「電流密度を上げると電解液温度が上がる」という因果関係があり、相関 $r_{x_1x_2} = 0.907$ から判断して、強い正の効果があるといえる。また、因果ダイアグラムから、品質と生産性のトレードオフ、すなわち、メッキ光沢度と生産性の相関係数 $r_{y_1y_2} = -0.829$ を生む構造として、両特性の共通原因である電流密度 x_1 と電解液温度 x_2 が考えられる。

メッキ光沢度 y_1 と生産性 y_2 を目的変数、電流密度 x_1 と電解液温度 x_2 をそれぞれ説明変数とした回帰式を求めると

$$\hat{y}_1 = -0.86x_1 \quad (5) \quad \hat{y}_1 = -0.89x_2 \quad (6)$$

(F=64.20) (F=86.2)

$$\hat{y}_2 = 0.94x_1 \quad (7) \quad \hat{y}_2 = 0.844x_2 \quad (8)$$

(F=173.2) (F=82.49)

となる。しかし、電流密度 x_1 と電解液温度 x_2 の両変数を説明変数とした回帰式を求めると

$$\hat{y}_1 = -0.30x_1 - 0.62x_2 \quad (9)$$

(F=1.747)(F=7.736)

$$\hat{y}_2 = 0.77x_1 + 0.18x_2 \quad (10)$$

(F=21.09)(F=1.168)

となる。(9)式と(10)式の偏回帰係数の値は、(5)式と(6)式、(7)式と(8)式の回帰係数の値と比べて大きく変化している。メッキ光沢度 y_1 を目的変数とした場合、特に電流密度 x_1 の回帰係数の値の変化が大きく、F値から判断すると電流密度 x_1 の効果は小さい。同様に、生産性 y_2 を目的変数とした場合、特に電解液温度 x_2 の回帰係数の値の変化が大きく、その効果は小さい。前述したように、偏回帰係数

の統計的意味から、「効果が小さい」とは「もう一方の説明変数を固定した条件の下で、効果が小さい」ことである。このような回帰係数の変化が大変重要な情報をもたらす。回帰係数の変化を技術的に解釈するところに回帰分析の醍醐味の一つがある。

上記の結果から、生産性 y_2 と電解液温度 x_2 の間の直接効果は強くなく、両変数の関連は電流密度 x_1 を経由するパスによる間接効果が大きいことが支持される。同様に、メッキ光沢度 y_1 と電流密度 x_1 の間の直接効果は強くなく（ただし、偏回帰係数に関するF値は、生産性 y_2 と電解液温度 x_2 の偏回帰係数のそれより大きい）、両変数の関連は電解液温度 x_2 を経由するパスによる間接効果が大きいことが支持される。以上の解析結果から、効果が大きいと考えられるパスのみを描くと、因果ダイアグラムは図15のようになる。

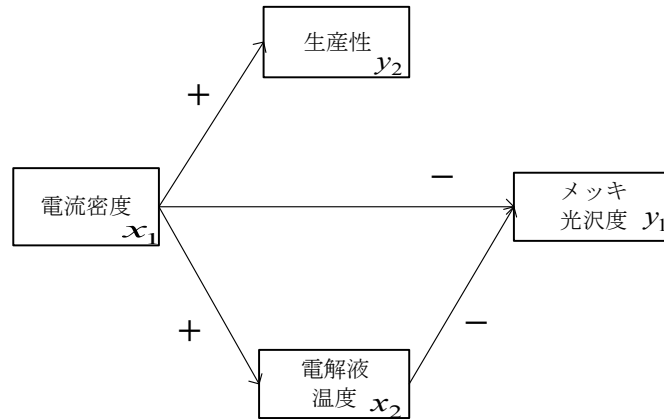


図15 メッキ工程の因果ダイアグラム（事後情報）（仁科，永田（2002））

回帰分析の醍醐味のもう一つは、説明変数の回帰モデルへの出し入れによって改善効果をシミュレートできることである。図15から、品質を下げずに生産性を向上させるためには、電流密度 x_1 を上げても電解液温度 x_2 が上がらないような、すなわち、電流密度 x_1 から電解液温度 x_2 への因果を断ち切るようなアクションが考えられる。具体的なアクションとして、メッキ液のバイパスを設置し、電流密度を上げて電解液温度が上がらないようにすることが実施された。

(5)式に対して電解液温度 x_2 を説明変数として取り込むことは、上記のアクションの改善効果（改善後に、生産性向上のために電流密度 x_1 の値を上げることによる光沢度への効果）をシミュレートすることになる。変数選択はデータ解析のアプリケーションソフトを使えばクリック一つで解を出力してくれる。クリック一つでシミュレーションが可能である。

元来、回帰分析は予測や要因分析の手法として品質管理でも多用されてきた。一方、本事例は回帰分析を因果分析に応用したものである。上述したように、どの説明変数を回帰モデルに取り込むかによって偏回帰係数の値が変化する。場合によっては符号が逆転することもある。偏回帰係数の変化を技術的に解釈することによって、探索的に因果モデルを構築していくことができる。このような一連の過程は図13に示した仮説生成のプロセスである。また、因果を断ち切るというアクションに対する効果をシミュレートすることもできる。予測以外でも回帰分析は意外と役に立つ。これが回帰分析の醍醐味である。

ただし、回帰分析では因果モデル全体の適合の評価はできない。各回帰式の寄与率での評価に留まる。因果モデル全体の適合の評価は、パス解析によって可能となる。

4. 品質のつくり込みについて思うこと

「携帯電話に代表されるガラパゴス現象」「ヨーロッパのホテルに設置されたテレビのほとんどがLG製」「iPhoneやiPadに使われている部品の多くが日本製」等々、技術があっても市場価値の創出が下手といわれる我が国のものづくりは、商品企画の段階で弱点もっているのは事実であろう。企画品質に問題があると言える。標準化戦略でも世界に後れを取っている。しかし、ものづくり立国、品質立国の看板を降ろすわけにはいかない。

「我が国ものづくり産業における製造段階での組織力、現場力、および、生産技術力は世界に冠たるものがある」という点は異論がないであろう。何がこれらの力を支えているのであろうか。その一つに「品質へのこだわり」が挙げられるのではないかと。再度、図2を見ていただきたい。SONY in Japanの分布に示された我が国の製造現場の品質へのこだわりは、DNAとして現在に伝承されている。

以心伝心、阿吽の呼吸、おみこし経営などのことばに表現されるように、ISO 9000が普及し始めたとき「我が国にはドキュメント文化が乏しい」と言われた。しかし、「ドキュメント文化」に乏しくても、製造現場には「見える化の文化」がある。また、自動車産業に代表される開発・設計と製造でのつなぎのマネジメント（バリューチェーン）は、製造現場での組織力と現場力をベースとしたものであり、簡単にはまねのできない管理技術である。

以上、我が国のものづくりの強みを踏まえた上で、その強みを伸ばし、さらに活かす方向で、限られた範囲ではあるが品質のつくり込みについて筆者の思うところを述べてみたい。

[生産財における価値創出力を伸ばす]

前述した「iPhoneやiPadに使われている部品の多くが日本製」ということを、「商品企画が下手」という弱みではなく強みの視点から考えるならば、生産財における高品質に裏打ちされた価値創出は世界をリードしていると言える。高付加価値の生産財を低コストで生産する技術は、製造現場の組織力、現場力と相まって我が国の強みになっていることから、生産財における「高品質に裏打ちされた価値創出」の強みを強化させ、さらに消費財に反映させることが必要ではないか。

商品企画が弱いと言われる我が国ではあるが、手をこまねているわけではない。例えば、家電エコポイント終了で国内需要が落ち込み、また、1インチ1000円割れという値下げ競争（日経新聞2011年5月5日）となったテレビ事業では、新興国市場に対して事業拡大の手を打っている。電力品質が悪いアフリカ向けには「停電しても見られる液晶テレビ」を、歌や踊りを大音響で楽しむ人が多いインド向けには「大口径のスピーカーを搭載した低価格テレビ」を発売するなどである。このような状況下で、高品質・低コストの実績をもつB2B企業においてさらに付加価値を高めた低コストの生産財を創出することがブランド力の向上（余田（2010））につながり、B2C企業（消費財）の事業拡大にもつながる。

[開発・設計段階のプロセスの見える化]

組織力・現場力をベースとした製造段階での見える化の文化やつなぎのマネジメント力を開発・設計段階に展開することは、我が国のものづくりの強みをさらに強化することに繋がる。ただし、製造段階での「もの」の流れが開発・設計段階では「情報」の流れに代わる。流れがintangibleになり暗黙知になりがちであるので、その分余計に見える化の工夫が必要となる。

商品企画が主体となり顧客の声を要求品質項目に展開し、一方では開発・設計が要求機能を機能要素に展開する。それらの対応づけを行うことによって、商品企画と開発・設計とのつながりを形式知化する。ここで、見える化のツールとして品質機能展開が活用される。機能や性能を決める製品企画の段階では、企画と開発・設計のつながりが大切である。

さらに、開発・設計は機能要素と設計要素との対応づけを行い、各設計要素のつくり込みを担う設計業務（製造における要素工程に相当）に展開する。企画と開発・設計のつながりを見える化すると同時に、各設計業務のインプットとアウトプットを明確にし、業務間のリンクを見える化する。設計業務は一つひとつの意思決定の連鎖である。意思決定の良否がその場で分かるしくみづくりができて、始めて製造段階での見える化が開発・設計段階に展開ができたと言え、設計プロセスでの品質のつくり込みが保証できる（詳しくは、(社)日本品質管理学会中部支部産学連携研究会 編（2010）を参照）。

[場当たりのシミュレーションからの脱却]

1980年代の工作機械のNC化（CAM）に始まり、設計環境は大きく変化した。3次元CAD、CAE、ラピッドプロトタイプをツールとした、製品開発のIT化によってビジネススピードの競争に拍車がかかり、コンカレントエンジニアリングの重要性が増している。このような状況において、日本製造業の強みを活かし、設計部門と製造部門との連携をさらに強固なものとすることがビジネスプロセス革新の一つの課題となる。3次元CADをCAEとリンクさせることによって、試作品による実機実験をシミュレーションによる評価に置き換えることがコンカレント化へ大きく貢献している。さらに、最適化支援エンジンを利用することによって自動的に最適条件まで求めることが可能である。シミュレーション実験にタグチメソッドを用いた最適化の事例も多い。

しかし、一方では、このようなデジタル化によって開発リードタイムは減少しても、技術のブラックボックス化による設計者の技術力の低下を危惧する議論もある。これは設計と製造との連携の形骸化にもつながる恐れがある。例えば、シミュレーションモデルの合わせ込みや詳細設計段階での適合問題において、場当たりのシミュレーションに陥ることなく、シミュレーション結果を生んだメカニズムを技術的に検討できるように実験計画法を活用することが必要である。これについては吉野、仁科（2010）が参考になる。また、現状ではシミュレーション結果の下流再現性は必ずしも十分ではなく、設計開発コスト削減の阻害要因となっている。

この分野は今後の研究が期待される分野である。シミュレーション工学と統計学の融合による「数値実験統計学（椿（2008））」の発展が望まれる。

[製造品質のばらつきを設計がつくり込んでしまう]

生産要素の5M1Eのうち、materialとmethodは図面で決まる部分が少なくない。すなわち、製造のばらつきの要因として設計が絡む可能性がある。間違っても、製造品質のばらつきを生む原因を設計がつくり込んでしまうことは避けなければならない。

昨今のCAD環境下では、設計者は自ら試作品をつくった上で機能評価を行うわけでないで、効率的な反面、自ら手を汚して苦勞を重ねる機会が減っている。したがって、使用環境や製造要件等を全く知らない経験の浅い設計者であっても、機能や製造加工上のばらつきにあまり考えを及ぼすことなく、パーツライブラリから流用設計を行うことによって簡単に図面は描けてしまう。このような設計環境では、設計が製造のばらつきを生む原因をつくり込んでしまう罠に陥りやすくなっていないだろうか、さらに、それが潜在化していないだろうか。流用設計前提で検討するにしても、設計者はその部品の機能を理解して、製造段階でのばらつきのメカニズムを考慮することが必要である（詳しくは、(社)日本品質管理学会中部支部産学連携研究会 編（2010）を参照）。

〔設計が必要とする工程能力情報〕

設計段階において製造性評価を行うとき、製造からの情報として不可欠なものに工程能力がある。工程能力を一つの条件として設計の意思決定が行われる。しかし、製造からの情報は本当に設計に必要なものになっているのだろうか。

ここで二つの誤解があるように思える。一つは工程能力と工程能力指数との混同である。工程能力とは「6倍の標準偏差」あるいは「平均値±3倍の標準偏差」であり、工程能力指数（CpやCpk）は与えられた規格に対する工程能力の満足度である（木暮（1975））。

二つめは工程能力を評価する際の特性の問題である。工程能力は生産行為の結果で量る。評価される特性は、規格が与えられている保証すべき特性（保証特性とよぶこととする）であることがほとんどである。しかし、保証特性は生産技術の能力を測る特性（技術特性とよぶこととする）と必ずしも一致しない。工程能力は後工程に対する保証特性の情報と、生産技術に対する技術特性の情報の二面性をもつ。特に製品が高度化し、製品形状も複雑化すると保証特性も複雑なものとなる。その特性をつくり込む生産技術も高度化し、いくつもの技術要素が組み合わさって、あるいは繰り返されたものとなる。

保証特性と技術特性が必ずしも一致しない代表的な例は、複雑な部品形状の直角度や位置度などの幾何特性である。製造部門は工程能力の二面性を考慮し、設計が必要とする技術特性に関する工程能力の情報支援が必要である（詳しくは、仁科（2009）を参照）。

〔製造におけるフロントローディング〕

前述したように、製造における品質のつくり込みは流動準備期、試験流動期、初期流動期を経て量産流動期に至る一連のプロセスのなかで行われる。各期において4つのアプローチを駆使してばらつきの低減と工程の安定化が図られる。初期流動期および量産流動期におけるアプローチBを中心とした改善活動や維持活動は、我が国製造業の得意とするところである。さらに、できるだけ早期に量産流動期に移行するための管理活動が必要である。そのためには、量産流動期の問題を前倒した流動準備段階でのフロントローディングがポイントとなる。

流動準備段階では、機械能力の確保と設備のパラメータの条件だしが目的となる。量産流動期をシミュレートした実験によってばらつき、すなわち、機械能力を評価し、かつ、設備パラメータの条件だしを行う。流動準備期はライン編成前であるので、ライン編成後を想定したばらつきの評価が必要である。流動準備期は日常の操業下ではないことから、実験計画によってばらつきを評価することが比較的容易である。ライン編成後を想定した実験による評価は、ライン編成後の問題を前倒しすることになり、このことは流動期の工程能力確保を容易にする。

設備パラメータの最適化を図るには、アプローチDが効果的である。ライン編成後を想定した5M1Eの要素を因子とした実験計画を立て、その実験結果から変動（機械能力）を評価することが望ましい（葛谷、岩本（2001））。例えば、意図的に材料の条件を振らし、さらに刃具・砥石ドレス・電極交換前後など量産時の変動要因を盛り込んだ実験計画とする。これらの実験因子は量産期の段階では外乱である。また、設備パラメータ自体も一定値に設定されるわけではない。その変動も考慮した実験計画を立てることが望まれる。設備パラメータの変動は内乱である。このばらつきへの対応は、アプローチBによって設備パラメータの許容される変動範囲を定めることである。

〔管理図は教科書どおりではうまく使えない〕

前述した製造における品質のつくり込みのプロセスにデータ解析を活用した管理活動を「統計的工程管理（SPC：statistical process control）」とよぶ。我が国ではSQC教育には実績があり、そのカリキュラムのなかで管理図や工程能力などSPCに関する教育も十分行われてきた。一昔前までは「品質管理は管理図に始まり、管理図に終わる」とまで言われていた。

しかし、SPCの実践という視点からみれば多くの課題がある。例えば「管理図が教科書どおりにうまく使えない」という問題である。設備集約型の加工ラインではフィードバック制御が行われ、工程の「いつもの状態」が定常モデルであるとは限らない。あるいは、工程能力は問題ないにもかかわらず、教科書通りの「既製品の」管理図を使うと管理限界を超える点が多発する。このような工程に管理図管理をどのように行えばよいか、といった問題である。

管理図の基本的な考え方である「帰納的な管理」、すなわち、今までの「いつもの状態」を把握した上で、これからは「いつもの状態」であるかどうかをモニタリングする、という考え方は不変である。問題は「いつもの状態」をどのようにして把握するかであり、そのポイントはモニタリングする管理特性をどのように設定するかである。必ずしも教科書どおりの「品質特性の $\bar{X}-R$ 管理図」がよいとは限らない。仁科（2009）にいくつかの事例が紹介されているので参照されたい。

5. 工場長養成塾（むすびにかえて）

冒頭で述べたように、小論の一部は「工場長養成塾」の教材がベースである。工場長養成塾は平成17～18年度に経済産業省による製造中核人材育成事業の一つに採択されたことが端緒であり、平成19年度から豊田自動織機株、デンソー技研センター株の協力のもと名古屋工業大学が主催する社会人教育の事業である。本事業の対象は東海地区の中堅中小企業の製造ラインの責任者（あるいは候補者）である。2010年度まで試行を含めて5回実施し、計124名が修了している。ゼミ、実践、実習、工場見学、報告会によって構成されたカリキュラムを9月から翌年3月まで146時間にわたって実施する。本学経営工学関連の教員は「ゼミプログラム」の講師として参

画している。筆者は品質管理を担当し、小論の第1節と第2節の内容を講義している。第2節のばらつき減少のための4つのアプローチに関するゼミでは、各社から品質改善に関する事例を提供してもらい

①その改善事例はどのアプローチを使った改善か

②他のアプローチは使えないか

を課題としてグループディスカッションを行っている。その議論が実に興味深い。講師にとって大変参考になる。グループディスカッションでの議論は小論の第2節に反映させて頂いた。留学生とそのティーチングアシスタントとして日本人学生も参加し、本学工学専門教育の良い教材にもなっている。

上記の製造中核人材育成事業がそうであったように、団塊の世代がリタイアする時期を迎え技術伝承の問題（いわゆる2007年問題）への対策事業を皮切りに、いくつかの人材育成事業がスタートした。後発ではあるが、福島県が主催する「ふくしま工場長育成道場」もその一つである。工場長養成塾は平成21年度から「ふくしま工場長育成道場」を支援し、一種の技術移転として製造中核人材教育のノウハウを伝えている。参加企業のなかには今回の大震災で被災した企業もある。大変な状況下であると思われるが、福島県では今年度（平成23年度）も実施の予定である。我が国のものづくり産業は元気を失っているわけではない。

参考文献

- 吉川弘之「工学への誘い」『工学がわかる』AERA Mook, Special Number 68, 朝日新聞社, 2001, 4-8.
飯塚悦功『ISO 9000とTQC再構築』日科技連, 1995.
Taguchi, G., *Taguchi on Robust Technology Development*, ASME Press, 1993.
狩野紀昭「品質の進化—持続的成長への道—」*Proceedings of International Conference on Quality*, 2005, 44-57.
立林和夫『入門タグチメソッド』日科技連, 2004.
仁科健『統計的工程管理—製造のばらつきへの新たな挑戦—』朝倉書店, 2009.
圓川隆夫, 宮川雅巳『SQC理論と実際』朝倉書店, 1992.
仁科健, 永田靖「重回帰分析における偏回帰係数の解釈について」『品質』Vol. 32, No. 3, 2002, 126-135.
(社)日本品質管理学会中部支部産学連携研究会編『開発・設計におけるQの確保』日本規格協会, 2010.
木暮正夫『工程能力の理論とその応用』日科技連, 1975.
吉野睦, 仁科健『シミュレーションとSQC—場当たりのシミュレーションからの脱却—』日本規格協会, 2010.
椿広計「シミュレーションにおけるSQCの貢献」『品質』Vol. 38, No. 1, 2008, 6-11.
宮川雅巳『SQCの基本』日本規格協会, 2008.
司馬正次「言語情報の解析」『品質』Vol. 17, No. 4, 1987, 65-67.
仁科健, 入倉則夫, 藤原寛「グラフィカルモデリングを用いた部品加工工程の要因分析」『品質』Vol.27, No.4, 1997, 78-87.
亀谷剛, 仁科健「経営品質向上活動で得られる成果生成プロセスのモデル構築」『品質』投稿中, 2011.
葛谷和義, 岩本伸夫「活用「多変量管理図」」『日本品質管理学会第67回研究発表会発表要旨集』2001, 1-4.
余田拓郎「B2Bコミュニケーションの新たな基軸」AD STUDIES, Vol. 32, 2010, 20-25.