モノづくりのスマート化に資する品質管理の方法
—ベイズ理論・情報理論・統計科学を通じて—

竹本　康彦，有薗　育生，棚橋　秀斗

モノづくりの分野は社会情勢から大きな変革が求められている．その一つとして，モノづくりにおけるデジタル・トランスフォーメーション (DX) の推進は大きな課題である．特に，モノづくりにおける DX の中心は「データ」である．製造現場に存在するデータをうまく活用することに注目が集まっている．本稿では，品質管理に関する現在の事例を簡単に紹介しつつ，従来の数理統計的手法にくわえ，ベイズ理論や情報理論，統計科学の方法を用いたわれわれの研究の紹介を通じて，DX 環境のもとで時々刻々と取得されるデータをうまく活用することの指針を示すことを目的とする．

キーワード：統計的工程管理，数理統計学，ベイズ理論，情報理論，統計科学，機械学習

1. はじめに

2020 年以降，新型コロナウイルス感染症の世界的な感染拡大が社会・経済のさまざまな側面に影響を与えている．くわえて，カーボン・ニュートラルの実現や人権尊重に向けた取組み，原油価格の高騰など，モノづくりを取り巻く環境は急激に変化しており，大きな変革が求められている [1]．その一つとして，モノづくりにおけるデジタル・トランスフォーメーション (DX) の推進は大きな課題である．特に，モノづくりにおける DX の中心は「データ」である．製造現場に散在するデータをうまく活用することに注目が集まっている．この取組みは「モノづくりのスマート化」につながっていく．

日立製作所や日本電気 (NEC) はそれぞれ製造現場のデータ活用を展開した DX ソリューションやプラットフォームを展開している．日立製作所では，Lumada と呼ばれるソリューションを用いて，たとえば製造ラインに関するさまざまなデータをオンラインで確認して遠隔地にある製造ラインの状況をリアルタイムに監視し，異常が発生したときには迅速に対応を行うことができる環境を提供している [2]．また，カメラより取得した作業者情報から作業手順ごとの時間をチャートし，見える化の結果から作業分析を実践し作業効率の向上につなげる環境を提供している [3]．NEC では，設備データや MES (Manufacturing Execution System) データを集約し，これを見える化し分析して，稼働設備の解析やトレーサビリティに活用できるものづくりデータ基盤「NEC Industrial IoT Platform」を提供している（たとえば，図 1）．

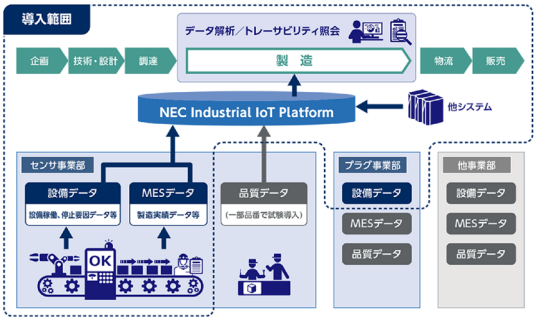

図 1　NEC Industrial IoT Platform [4]

DX ソリューションやプラットフォームでは，各工程から設備の稼働状況，作業員の状況，材料の到着状況などの 4M (huMan, Machine, Material, Method) データを収集し，納期遵守率や稼働率，リードタイムなどの KPI (Key Performance Index) を見える化・可視化する Business Intelligence (BI) ツール [5] が肝となっている．BI ツールは，企業内にあるさまざまなデータを分析のうえで可視化し，業務上の意思決定に役立てるソフトウェアやツールを指す．モノづくりの現場におけるデータの見える化・可視化のニーズは大きく，設備の稼働状況の把握，生産進捗管理，品質管理，スケジュール管理，工数管理など，さまざまな用途で活用されている [6]．

富士通は，オムロンの草津工場でのプリント基板の

たけもと　やすひこ
近畿大学理工学部機械工学科
〒 577–8502 東大阪市小若江 3–4–1
takemoto@mech.kindai.ac.jp
ありその　いくお，たなばし　しゅうと
岡山大学大学院自然科学研究科
〒 700–8530 岡山市北区津島中 3 丁目 1 番 1 号
arizono@okayama-u.ac.jp
tanabashi@s.okayama-u.ac.jp

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

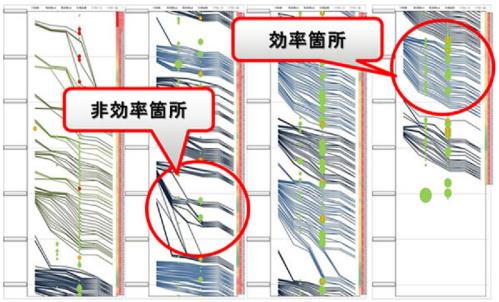

図 2　実証実験での可視化の結果 [7]

表面実装ラインにあるすべての装置での通過データを製品個体と紐付けて蓄積し，製品の流れと停滞，装置の運転状況を可視化する取組みを実践した [7]．図 2 では，縦軸を経過時間，横軸を表面実装ライン上の各工程とするグラフ上に，各製品の動きが折れ線で表現されている．折れ線と折れ線の間の空白部分がラインの停止や停滞を表し，これを受けて工程改善のアクションをとることができる．上述の例では位置情報を直接的に可視化することで工程改善のアクションに直結する情報を得ることができたが，製造データから工程の改善や生産性向上のために発見すべき問題を抽出するにあたって新たな解析手法を考える場合もある．すなわち，解析に基づく見える化・可視化の結果として気づきを得て，実際にアクションにつなげられるような解析手法を探求することも必要である．

品質管理の分野では，これまで数理統計学に基づく統計的方法により多くの品質管理手法が開発され，長年にわたって運用されている．抜取検査や統計的工程管理，実験計画法においては，ISO や JIS を始め，多くの場で紹介され，実用に供されている．さらに，統計的工程管理においては，より詳細な検討をするための方法として，異常検知にくわえて，変化点検出や異常特性の特定といった手法が提案されてきた [8]．変化点検出とは，管理図などで工程異常が検知された場合，その異常がいつの時点から引き起こされていたものかを推定するものである．また，複数の特性を同時に取り扱う場合に工程異常を検知したとき，いずれの特性が異常の原因となっているのかを調べる必要があり，異常特性を特定する方法が考察されている [9]．2000 年以降では，工程における説明変数と応答変数間の機能的関係を管理することを目的したプロファイル・モニタリングの手法も提案されている [8]．

データの取得環境や計算機の処理速度の向上から，数理統計学をベースとした方法だけでなく，情報理論やベイズ理論，ひいては機械学習手法を用いた品質管理手法も研究論文として報告されている．情報理論のうち，Kullback-Leibler (K-L) 情報量 [10] を用いた統計的工程管理の方法は Takemoto and Arizono [11] において整理されている．これまでに，K-L 情報量を応用して異常検知や変化点検出，異常特性の特定，さらにプロファイル・モニタリングの手法が提案されている．なかには，情報理論だけに留まらず，これより派生した統計科学における情報量規準 [12] を用いたものも見受けられる．また，解析結果の可視化として，情報可視化の方法を応用した統計的工程管理方法についても考察がされている [13]．くわえて，Takemoto and Arizono [14] はベイズ推定と情報理論を用いた製造工程の初期流動管理における安定性評価の方法を提案している．

既述のとおり，現在では DX 推進のもとで，データの取得環境が整備され，計算機による高速なデータ処理・分析が可能な環境が実現されようとしている．このとき，必ずしも従来の数理統計的手法に限定されず，さまざまな理論を応用した品質管理手法の展開が期待できる．本稿では，ベイズ理論や情報理論，統計科学の方法を用いた統計的工程管理に関するわれわれの研究の紹介を通じて，DX 環境のもとで時々刻々と取得されるデータをうまく活用するための指針を示すことを目的とする．

2.　研究紹介

ここでは，まず従来の数理統計学に基づく統計的工程管理手法，特に管理図について概説する．ついで，ベイズ理論・情報理論・統計科学を導入した統計的工程管理手法を紹介する．特に，DX 推進のもとで整備されたデータの取得環境において，リアルタイム性や見える化・可視化に焦点を当てた研究について記述する．具体的には，情報量規準を用いた変化点検出方法とこれに基づく工程のリアルタイムな状態変化追跡方法，情報可視化の方法を導入した工程状態のモニタリング手法，さらにベイズ理論と情報理論を用いた初期流動管理に関する工程管理手法を説明する．

2.1　従来の方法

ISO や JIS に掲載されている統計的工程管理の方法は，工程状態をモニタリングする管理図と適合品を産出する能力を評価する工程能力指数から構成される．特に，これら二つを用いた工程改善の手順が JIS Z 9020-2 [15] に図示されている．また，管理図については ISO7870 シリーズ（たとえば文献 [16]）に詳述されている．管理図の一例として，図 3 を示す．通常，

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

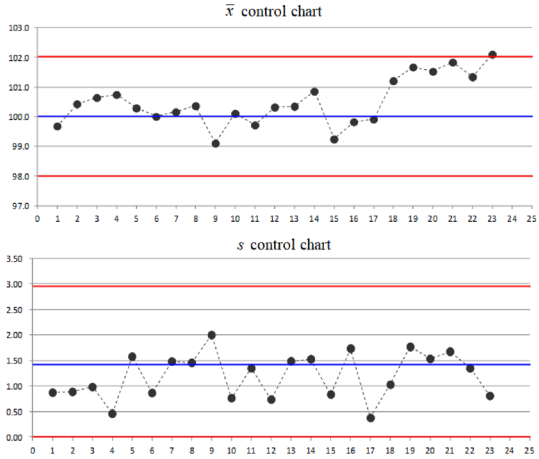

図 3　$\bar{x}$ 管理図と s 管理図

工程における品質特性の平均およびバラツキを管理の対象とすることから，標本平均および標本標準偏差を対象とした $\bar{x}$ 管理図と s 管理図が併用される．各々の管理図における横軸はサンプリング時点を意味し，縦軸は標本平均，あるいは標本標準偏差である．管理図は，工程が安定状態（管理状態）にあるか否かを見分けるために，統計学における検定を応用した手法である．ただし，時系列的な運用となるため，単なる統計的検定の枠組みを超えて，点列の挙動などにさまざまな考察がなされている．

2.2　変化点検出と状態変化追跡

管理図で工程異常が検知されたとき，第 2 種の誤りの存在から，その時点が必ずしも工程異常が引き起こされた時点とは限らない．つまり，実際に工程異常が引き起こされた時点から検出に至るまでに，異常状態（管理外れ状態）下で製品が製造されていたことになる．管理外れ状態の間に製造された製品に対して何らかの処理をするうえで，異常が発生した時点を特定することは重要な課題である．これを実現するための数理統計学に基づく方法として，尤度理論を適用した方法が考案されてきた [8]．具体的に，管理状態と管理外れ状態を分ける時点（変化点）を仮定し，この統計モデルに基づく最大対数尤度を評価する．さらに，仮定された変化点のもとでの最大対数尤度を最大化する変化点を探索する．ただし，上述の尤度理論に基づく変化点の検出方法では，一つの管理状態に対して，一つの管理外れ状態のみを想定し変化点を導出するに留まっていた．尤度理論では，工程異常に対して想定する統計モデルでのパラメータ数が異なる場合に適切なモデルの選択ができない問題があったためであり，多くの

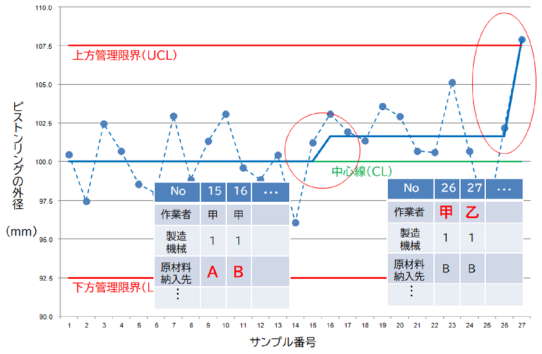

図 4　状態変化追跡方法　[18]

研究が規定した管理状態と管理外れ状態のいずれかへと峻別するだけの統計モデルの解析に留まっていた．

これに対して，通常，管理外れ後の状態遷移がさまざまに想定されることから，パラメータ数の異なる統計モデルにおけるモデル選択の問題として情報量規準を応用することが考えられた．竹本と有薗 [17] では，工程平均の推移をモニタリングする $\bar{x}$ 管理図に対して，複数回の段階的状態変化を追跡できる状態変化追跡方法を提案した．状態変化追跡方法の一例として，図 4 を示す．具体的に，図 4 において点列の間を縫って段階的な状態遷移を表現する工程平均の変化の軌跡の抽出が状態変化追跡方法の肝となる．状態変化の軌跡を抽出することにくわえて，図 4 に示すように，複数回の変化点の前後での製造条件などを比較することで，工程異常の要因を特定する手がかりを得ることが考えられる．なお，この状態変化追跡方法は，管理図において異常が検出された時点をトリガーとした例を与えているが，任意の時点で適用可能である．つまり，現時点に至るまでの工程状態の変化の軌跡を抽出することができ，最新のデータが追加されるたびに情報を更新し，リアルタイムに工程状態の推移をモニタリングすることができる．また，竹本と有薗 [19] では，平均と分散を同時に取り扱ったうえで，複数の段階的変化を想定した工程状態の変化の軌跡を抽出することを可能としている．上述の研究では，品質特性を正規分布として取り扱っているが，工程不良率を対象とした場合 [20] や欠点数を対象とした場合 [21] の状態変化追跡方法も提案されている．最新の成果である棚橋ら [21] や Tanabashi et al. [22] をはじめ，状態変化追跡方法の詳細は後続する別稿にて記す．

2.3　情報可視化

「見える化」や「可視化」といった言葉が叫ばれるようになって久しい．単に集約されたデータをあれこ

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

れ組み合わせて可視化するだけでは，必ずしも目的に応じた意思決定の助けにはならない．製造データから生産性向上のための合理的かつ効率的方法を確立するにあたって，目的に応じた意思決定支援のための解析手法が必須である．解析に基づく見える化・可視化の結果として気づきを得て，実際にアクションにつなげられるような解析手法を探求する必要がある．ただし，人間の視知覚や表示方法の制約から，可視化にあたっては二次元平面上に落とし込まれるのが一般的である．情報伝達の一手法であり，そのままだと視知覚しづらい情報を，人間が理解できる形に落とし込む方法を探究する取組みに「データビジュアライゼーション」[23] や「情報可視化」[24, 25] と呼ばれるものがある．端的に言えば，これらは視知覚を容易にすることを目的として，データがもつ特性をグラフィカルにわかりやすく表現することである．（事例を含め，詳しい説明は拙稿 [26] を参照）．

前節において，工程平均と工程分散の状態変化追跡方法 [19] が提案されている旨は説明した．両方の管理図を並列とする図 3 では，個別の変化をモニタリングするには適切ではあるが，両方が連動する場合のように両方の変化を関連付けて考えた場合の工程状態のモニタリングやその解釈は難しい．そこで，$\overline{x}-s$ 平面上に管理図を展開する方法がある．この一方法として，Taguchi の損失関数 [27] に基づく工程の損失評価

$$L=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-T)^2=(\overline{x}-T)^2+s^2 \qquad (1)$$

を用いた管理図が存在する [28]．ただし，x_i，$i=1,\cdots,n$, は工程より得られる品質特性値であり，n はサンプル・サイズを意味する．また，T は品質特性の目標値であり，各々の統計量は

$$\overline{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \qquad (2)$$

$$s^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2 \qquad (3)$$

である．なお, 厳密には式 (1) に製品の機能限界とその損失により定まる定数が掛けられる．式 (1) の Taguchi による損失関数を統計量として採用する管理図は，良品・不良品にかかわらず，目標値からの乖離により損失を評価することと同時に，工程平均と工程分散の動向を一つの平面にて管理できる特徴をもつ．したがって，この管理図ではバラツキとして表現される品質をコスト概念と結び付け，工程異常の見過ごしがどれだけの損失を生じるのかといった点を可視化することが可能となる．式 (1) の統計量の分布は非心カイ二乗分布に従うことがわかっており，Patnaik 変換 [29] によりカイ二乗分布へ近似することができる．結果として，カイ二乗分布の上側確率を用いて工程を異常状態と判断する領域，要注意状態と判断する領域などを設定することができる．情報可視化の考えを取り入れ，工程平均・分散と工程損失の推移を可視化する方法として，大谷ら [30] は図 5 のような管理図を考案した．具体的に，図 5 では横軸が式 (2) の標本平均，縦軸が式 (3) の平方根である標本標準偏差であり，工程状態の推移が 2 次元平面上で表示される．各点が各時点での工程状態を意味し，点の大小・濃淡において時間経過を可視化している．具体的に，最新のデータほど大きく色濃く，古いデータほど小さく色薄く表示するような工夫がされている．工程損失は理想状態を中心に同心半円状に同じ損失値を計上する．円の中心が目標値であり，半円が工程損失値とともに，工程状態の判断を与える境界線をも表す．図 5 中の内側の半円が工程損失の観点において要注意状態と判断する境界線，外側の半円が異常状態と判断する境界線を示す．色彩として，同程度の工程損失と推定される点群を同色で表示し，青，橙，赤により，それぞれ安定状態，要注意状態，異常状態を峻別できるような工夫がされている．中央付近の折れ線が，推定される工程状態・損失値の推移を示す．図 5 は異常に対する警告時点での表示だが，通常は時間の経過とともに点列が追加されていく運用のため，観察中に情報可視化された結果を見て，工程管理者が何らかの意思決定を与えることが可能となる．ただし，解析結果からどのようなアクションをすべきかについては，品質特性における因果関係などの情報が必要であり，別途考察が求められる旨を申し添えておく．

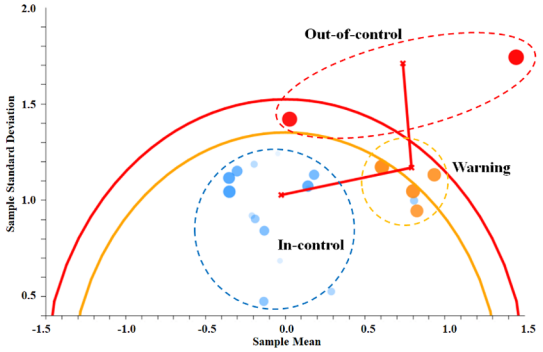

図 5　工程状態・損失の情報可視化

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

一方，情報理論に基づいた $\overline{x}-s$ 平面上の管理図も存在する．Kanagawa et al. [31] は，K-L 情報量の推定量をもとに，現工程の管理状態 $N(\mu_0,\sigma_0^2)$ からの乖離の程度を

$$\lambda=\frac{n}{2}\left\{\log\frac{\sigma_0^2}{s^2}-1+\frac{s^2}{\sigma_0^2}+\frac{(\bar{x}-\mu_0)^2}{\sigma_0^2}\right\} \quad (4)$$

として推定した．ただし，$N(\mu_0,\sigma_0^2)$ は母平均 μ_0，母分散 σ_0^2 の正規分布を意味し，$\overline{x},s$ は式 (2) および (3) のとおりである．また，本稿における対数はすべて自然対数を意味する．特に，この管理図は $(\overline{x},s)$ 同時管理図，あるいは $(\overline{x},s)$ 管理図と呼ばれている．すでに式 (4) の統計量 λ の分布について考察が与えられており，任意のサンプル・サイズ n に対応した近似分布をもとに管理限界を定めることができる [31, 32]．具体的に，$(\overline{x},s)$ 管理図の概形は図 6 のように与えられる．ここに，図 6 中の卵形の線が管理限界線を表す．

一方，$(\overline{x},s)$ 同時管理図は式 (4) の一統計量において工程平均と工程分散の同時管理を実践するものであったため，工程異常が示唆された場合，いずれの特性に異常の原因があったのかを知るための術が必要であった．Kanagawa et al. [31] は，式 (4) の統計量を平均と分散の情報量にそれぞれ分割し，各々に対して検定を適用した多重決定方式を提案している．ただし，多重決定方式は検定を重ねる方法であり，管理限界を設定するための第 1 種の誤りとの関係に整合性がとれない場合が考えられた．これとは別に，Takemoto and Arizono [13] は，K-L 情報量から展開された情報量規準，特に Akaike Informarion Criterion (AIC) に基づき工程状態を推定するための方法を提案した．具体的に，工程状態を表す統計モデルとして，工程状態を表す四つの正規分布 $N(\mu_0,\sigma_0^2)$，$N(\mu_1,\sigma_0^2)$，$N(\mu_0,\sigma_1^2)$，$N(\mu_1,\sigma_1^2)$ を想定する．ただし，μ_1,σ_1^2 は管理外れ状態での工程平均・分散であり，それぞれの統計モデルのもとでの最尤推定量として求められる．四つの統計モデルでの AIC として

$$\mathrm{AIC}(\mu_0,\sigma_0^2)=n\log(2\pi\sigma_0^2)+\frac{ns^2+n(\bar{x}-\mu_0)^2}{\sigma_0^2} \quad (5)$$

$$\mathrm{AIC}(\hat{\mu}_1,\sigma_0^2)=n\log(2\pi\sigma_0^2)+\frac{ns^2}{\sigma_0^2}+2 \quad (6)$$

$$\mathrm{AIC}(\mu_0,\hat{\sigma}_1^2)=n\log\left[2\pi\{s^2+(\bar{x}-\mu_0)^2\}\right]+n+2 \quad (7)$$

$$\mathrm{AIC}(\hat{\mu}_1,\hat{\sigma}_1^2)=n\log(2\pi s^2)+n+4 \quad (8)$$

を得ることができる．各工程状態に対して，式 (5) から式 (8) によって算定される四つの値のうちで最小の値を与える統計モデルを現在の状態として判定することとなる．このとき，Takemoto and Arizono [13] は，情報可視化の方法を用いて，工程状態の推移を視覚化するための方法を併せて提案した．コンセプトとして，すぐわかる，誰でもわかる，さらに「見える化」したデータから気付きを得て，実際のアクションにつなげられる方法を目指した．具体的な様相として，図 6 を示す．卵形を除く境界線は，式 (5)〜(8) のうち二つを取り出して等価として得られたものを整理した結果で，各領域において最小の AIC を与える統計モデルを現在の状態と推定する．図 5 と同様，各点が各時点での工程状態を意味し，点の大小・濃淡において時間経過を可視化している．図 6 において，卵形が工程異常を検知するための管理限界，その他の線が工程状態を峻別するための補助線となる．具体的に，補助線によって，工程平均のみ，工程分散のみ，工程平均と分散の両方が変化した場合を峻別している．管理限界内での状態の峻別は，実際に工程異常を示唆してはいないが，その危険性を示す警告領域と理解できる．

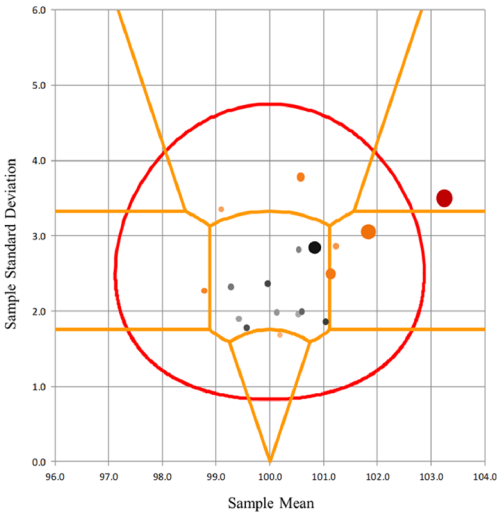

図 6　情報量規準に基づく状態推移の情報可視化 [11]

2.4　安定性評価

一般に製造工程において，製造の初期段階から安定的な製造を行えるようになるまでには一定の時間を要する．この状況下で量産体制への移行を実現するためには，工程が安定的な生産状態，いわゆる管理状態に移行したといえるかどうかを判断する必要がある．安定状態の判定が早すぎれば品質の低さが余計な損失を招き，遅すぎれば生産性を損なう可能性があるため，適切な時期に安定と判断を下すことは工程管理のうえ

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

で重要である．JIS Z 9020-2 [15] では，一定期間得られたデータ群に対して，標準値が与えられていない場合の管理図を作成し，点列の傾向や管理限界に基づく安定性を評価する方法が示されている．ただし，この方法は，一定の期間においてデータが得られたうえで，これらのデータを一括して管理状態の判定を行うものであり，稼働している製造工程からデータが得られるたびに逐次的に安定性を評価するものではない．JIS Z 9020-2 [15] や ISO7870-2 [33] では，一般に一定期間は 25 期間程度と示されている．一方，Takemoto and Arizono [14] は工程状態を逐次的に観測し工程平均における安定性を評価する方法を提案した．この方法では，ベイズ理論に基づき製造工程での品質特性値の工程平均を確率変数として捉え，その分布（共役分布）を正規分布として想定し安定性を評価している．具体的には，工程平均の分布（共役事前分布）を観測結果に基づき逐次的に更新し，共役事前分布と更新によって求まる共役事後分布の変化の程度を K-L 情報量により評価し，工程平均における安定性を定量化している．また，植中ら [34] および石濱ら [35] は，同様の手順で工程分散ならびに工程不良率における安定性を評価する方法を提案した．

ここでは説明の簡便さの都合から，石濱ら [35] による成果を要約する．ベイズ理論では，母数を定数ではなく確率変数として扱う．特に，ベイズ更新では，データが得られるたびにデータに対して想定している母数の分布を更新する．通常，品質不良数の分布を二項分布として想定するので，共役分布はベータ分布と考えられる．今，t 期におけるサンプリングの結果，不良個数 x_t が得られたとき，これを反映した不良率 p_t の事後分布として

$$g_{\mathrm{POS}}(p_t|x_t)=k_t p_t^{a_t-1}(1-p_t)^{b_t-1} \tag{9}$$

を定める．なお，a_t および b_t は上述のベータ分布のパラメータ，k_t は式 (9) が確率分布たる要件を満足するための規格化定数である．また，t 期の事後分布である式 (9) は，$t+1$ 期の事前分布ともなることから

$$g_{\mathrm{PRI}}(p_{t+1})\equiv g_{\mathrm{POS}}(p_t|x_t) \tag{10}$$

の関係が成り立つ．さらに，$t+1$ 期において，n 個のサンプリングの結果として不良個数 x_{t+1} が得られたとすると，尤度関数は

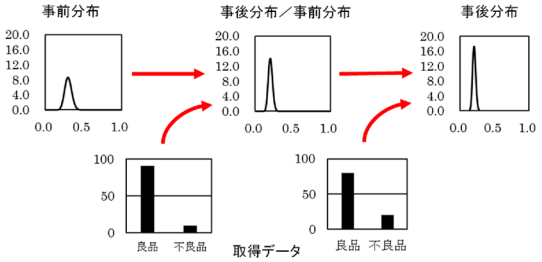

図 7　母数の分布の更新

$$L(x_{t+1}|p_{t+1})=\begin{pmatrix} n \\ x_{t+1} \end{pmatrix} p_{t+1}^{x_{t+1}}(1-p_{t+1})^{n-x_{t+1}} \tag{11}$$

となることから，$t+1$ 期の事後分布は

$$\begin{aligned} g_{\mathrm{POS}}(p_{t+1}|x_{t+1}) &\propto L(x_{t+1}|p_{t+1})g_{\mathrm{PRI}}(p_{t+1}) \\ &= k_{t+1}p_{t+1}^{a_{t+1}-1}(1-p_{t+1})^{b_{t+1}-1} \end{aligned} \tag{12}$$

と求まる．このとき

$$a_{t+1}=a_t+x_{t+1} \tag{13}$$

$$b_{t+1}=b_t+n-x_{t+1} \tag{14}$$

の更新則が得られる．図 7 に示すとおり，これを繰り返し実行し，母数の分布が更新される．さらに，事前分布 $g_{\mathrm{PRI}}(p_{t+1})$ と事後分布 $g_{\mathrm{POS}}(p_{t+1}|x_{t+1})$ 間の乖離の程度を K-L 情報量により評価する．具体的に，式 (9) と式 (12) の分布間の乖離は

$$\begin{aligned} I(g_{\mathrm{POS}},g_{\mathrm{PRI}}) &= \log k_{t+1}-\log k_t \\ &\quad +(a_{t+1}-a_t)\{\psi(a_{t+1})-\psi(a_{t+1}+b_{t+1})\} \\ &\quad +(b_{t+1}-b_t)\{\psi(b_{t+1})-\psi(a_{t+1}+b_{t+1})\} \end{aligned} \tag{15}$$

と評価される．ただし，$I(g_{\mathrm{POS}},g_{\mathrm{PRI}})\neq I(g_{\mathrm{PRI}},g_{\mathrm{POS}})$ の関係のため，両者の平均である K-L ダイバージェンスをもって分布の近さが測られる．すなわち，K-L ダイバージェンスが小さいとき，分布が同等，すなわち安定した状況と考える．一例として，シミュレーションによって得た K-L ダイバージェンスの推移を図 8 に示す．たとえば，ある一定値をある一定回数下回れば，工程状態が安定状態になったと判断することが考えられる．

3.　今後の課題

前節で紹介した研究では特性値が数値として与えられていることを前提としているが，現実的には画像や

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

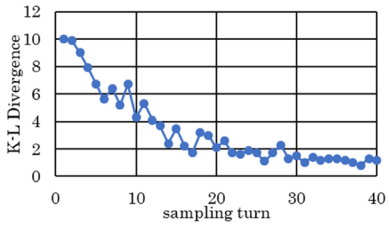

図 8　K-L ダイバージェンスの推移

図 9　欠損画像の K-L 値

映像などで与えられるデータを分析する場合もしばしばある．特に，DX 推進のもとでデータの取得環境が整備されつつある現状でも，画像データや映像データがしばしば用いられている．画像解析は，コンピュータにより画像のデータを抽出し，解析を通じて有用な情報を得るための情報処理手法の一つである．画像解析は，衛星写真の解析や顔認証，医療における画像診断，製品の外観検査など，幅広く応用されている [36, 37]．Zuo et al. [38] は，画像におけるノイズを正規分布で規定したうえで，製造物の外観の画像データに対する管理図を提案している．ただし，正規分布として扱われるデータは離散化のうえで RGB 値として表現される．

一方，角と竹本 [39] は，画像の各ピクセルの情報が RGB の離散特性で与えられることに鑑み，各特徴量に対して二項分布を想定した．このとき，ノイズの影響に頑健な検査システムを構成することを目的として，ベイズ更新により各ピクセルの値を推定した．さらに，ベイズ更新の前後で得られる特徴量分布の乖離の程度を K-L 情報量により計量的に評価し，これを画像に合わせたヒートマップ形式で表示し，異常箇所の可視化を実現した．一例として，図 9 を示す．図 9 中の (a) が事前分布から再現された画像データ，(b) が新しく取得した画像データ，(c) が事前分布と事後分布から得られる K-L ダイバージェンス値を用いたヒートマップである．ただし，事前分布の画像は MAP（Maximum A Posteior：最大事後確率）推定値に基づき再現した図であり，本来は各ピクセルでの特徴値は，RGB それぞれについて分布として与えられている．ヒートマップでは各ピクセルで特徴量 RGB の K-L ダイバージェンスの和により各ピクセルでの乖離度合が表現されている．(b) に大きな欠損箇所と小さな欠損箇所がそれぞれ 1 箇所ずつ見られることから，(c) のヒートマップ上でも同位置にくぼみが示され，異常として認識されている様子を示している．

閾値の設定もさることながら，ボトルネックとなる要素の一つが解析のための処理時間である．画像を詳細に認識し解析する場合，取得だけでも相当の時間を要する．たとえば，電子基板上のはんだ不良の外観検査などでは，対象製品が数秒間隔で次から次へと到着するため，高精細な画像取得はシステムに要求されている効率を大きく下げる結果となる．Zuo et al. [38] では，ROI (Region of Interest) と呼ばれる解析対象領域を広げながら異常の検知を実践するが，上記の問題から画像領域の認識は低解像度に抑えざるを得ない．領域の取り方や解析の手順に工夫を考えることが必要であり，この点は今後の課題と考える．

また，前述のとおり，統計的工程管理の一方法として，工程における説明変数と応答変数間の機能的関係を管理することを目的したプロファイル・モニタリングが提案されている [8]．プロファイル・モニタリングの研究も進められており，たとえば，Chang and Chen [40] は K-L 情報量に基づくプロファイル・モニタリングに関して考察している．DX 環境下では，リアルタイムに，かつ連続的にデータが取得される．つまり，入力と出力の関係や設備条件と出力の関係なども解析の対象となる．関係に関する知見を活用すれば，前工程での出来上がりに応じて，後工程の加工条件などの設定値を調整し，目的となる品質特性値を実現しようとすることが考えられる．また，これをリアルタイムに実現する環境も報告されている [41]．このとき，変数間の関係が規定・維持されていることが重要となる．竹本ら [42] は，品質特性が一入力・一出力で与えられ，工程で特性値間の変換がなされている状況を想定し，出力における異常が入力での異常なのか工程での異常なのかを峻別するための方法を提案している．たとえば，図 10 のような状況である．この関係は，プロファイル・モニタリングにも関係する内容であり，管理図のような経時的な関係性の管理と併せて異常時点の検出なども考えられる．これらは今後の課題として考えている．

4.　おわりに

現在では DX 推進のもとで，データの取得環境が整備され，計算機による高速なデータ処理・分析が可能

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

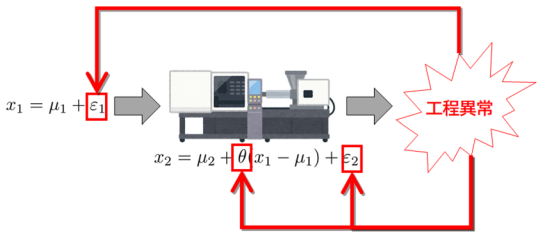

図 10　入出力特性を考慮した工程管理

な環境が実現されようとしている．本稿では，この現状を鑑み，これまで筆者らが取り組んできた統計的工程管理に関する研究を紹介した．特にここでは，リアルタイムな状態監視や状態推移の見える化・可視化について論述した．また，これらの方法の構築にあたっては，従来の数理統計学に基づく方法に限らず，情報理論やベイズ理論，統計科学の多岐にわたる方法を導入してきた．

これまでの数理統計学に基づく統計的工程管理の方法を参考に，モノづくり，特に統計的工程管理における DX でのデータの活用の指針を考えた場合，以下の三つが要諦をなすと考える．

- リアルタイム性
- 見える化・可視化
- 関連性の解析

それぞれについては，すでに本稿において述べてきた．これを踏まえたうえで，工程改善や生産性向上といった目的に応じて KPI を選定し，意思決定支援のための解析手法を開発する必要がある．同時に，解析に基づく見える化・可視化の結果として気づきを得て，条件や特性，あるいは特性間の関係をもとに実際にアクションにつなげられるような解析手法であることが望まれる．

昨今では，そのパフォーマンスの高さから深層学習 (Deep Learning) をはじめとする機械学習手法がよく用いられている一方，可読性の低さが指摘されている．マーケティングにおける予測や推薦システムなどにおいては，可読性は低いが高いパフォーマンスをもつ多くの方法が適用され実践に供されていると認識している．一方，医療の診断においても画像認識などで活用されているのはよく知るところだが，実際には医師の診断と合わせて考えることが普通だと思われる．その意味では，純粋にパフォーマンスだけではなく，その関係性に関する固有技術的な理論は結果を保証する意味で非常に重要な意味をもつ．ここにはやはり，現象をモデルとして捉える理論構築に大きな役割があると考える．人々にさまざまな便益やサービスを供する製品の品質については，その欠陥や不具合が何かしらの理論において保証されておくのが望ましいと考える．

謝辞　本稿において紹介する研究の一部は，JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2128 の支援を受けたものである．ここに謝意を表す．

参考文献

[1] 経済産業省,「2022 年版ものづくり白書」, https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2022/ （2022 年 12 月 15 日閲覧）
[2] 日立製作所,「製造ラインの生産性低下を防止する，リアルタイム監視」, https://www.hitachi.co.jp/products/it/lumada/spcon/uc_01776s/index.html （2022 年 12 月 15 日閲覧）
[3] 日立製作所,「作業映像を分析・見える化し，製品の品質安定化と生産性改善を支援」, https://www.hitachi.co.jp/products/it/lumada/spcon/uc_01726s/index.html （2022 年 12 月 15 日閲覧）
[4] NEC,「IoT プラットフォームで変わる製造業の未来 − 環境変化に対応できる「ものづくりスマート化」へ」, https://jpn.nec.com/manufacture/monozukuri/iot/case/ngk/index.html （2022 年 12 月 15 日閲覧）
[5] IBM,「ビジネス・インテリジェンス」, https://www.ibm.com/jp-ja/analytics/business-intelligence （2022 年 12 月 15 日閲覧）
[6] 内田洋行,「IoT と可視化で掘り起こす！ ものづくりの現場に埋もれる 80%の情報」, https://www.uchida.co.jp/system/report/20180017.html （2022 年 12 月 15 日閲覧）
[7] MONOist,「モノづくりをビッグデータ分析！ 富士通がオムロン草津工場で実証実験開始」, https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/1404/22/news067.html （2022 年 12 月 15 日閲覧）
[8] P. Qui, *Introduction to Statistical Process Control*, CRC Press, 2014.
[9] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control, 8th ed.*, John Wiley & Sons, 2020.
[10] S. Kullback, *Information Theory and Statistics*, Dover Publications, 1978.
[11] Y. Takemoto and I. Arizono, “Kullback-Leibler Information Control Chart,” *Wiley StatsRef-Statistics Reference Online*, https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat08408, 2023.
[12] 小西貞則，北川源四郎,『情報量規準』，朝倉書店，2004.
[13] Y. Takemoto and I. Arizono, “Information visualization about changes of process mean and variance on $(\overline{x}, s)$ control chart,” *Quality Technology & Quantitative Management*, **16**, pp. 496–510, 2019.
[14] Y. Takemoto and I. Arizono, “Stability evaluation in process mean using Bayesian statistics and information theory,” *Quality and Reliability Engineering International*, **38**, pp. 3062–3071, 2022.
[15] 日本規格協会，JIS Z 9020-2:2016 管理図—第 2 部：シューハート管理図，2016.
[16] International Organization for Standardization, ISO 7870-1:2019 Control charts–Part1: General

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

guidelines, 2019.
[17] 竹本康彦，有薗育生，“状態変化追跡方法，工程管理支援装置，工程管理支援方法，及び状態変化追跡方法及び工程管理支援方法を実行させるためのプログラム，”公開特許公報，特開 2013-029901, 2013.
[18] 竹本康彦，“インダストリー 4.0 に向けた ICT に基づくデータ分析，”経営システム誌，**24**, pp. 220–228, 2015.
[19] 竹本康彦，有薗育生，“状態変化追跡方法の提案とその利活用に関する一考察，”日本経営工学会論文誌，**66**, pp. 240–248, 2015.
[20] Y. Takemoto and I. Arizono, “Study on state transition tracking method in process fraction nonconforming,” *IFAC PapersOnLine*, **52**, pp. 130–134, 2019.
[21] 棚橋秀斗，竹本康彦，有薗育生，“ポアソン過程における状態追跡法，”日本経営工学会論文誌，**72**, pp. 159–168, 2021.
[22] S. Tanabashi, Y. Takemoto and I. Arizono, “Change point detection for multiple linear trend changes,” In *Proceedings of 22nd Asian Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS2022)*, Paper ID: IEM013, 2022.
[23] 加藤慶信，西村崇，“データビジュアライゼーションの極意，”日経情報ストラテジー，**285**, pp. 22–41, 2015.
[24] 技術論評社，「具体例で学ぶ！ 情報可視化のテクニック」，https://gihyo.jp/dev/feature/01/visualization/0001（2022 年 12 月 15 日閲覧）
[25] R. Mazza, *Introduction to Information Visualization*, Springer, 2009.（中本浩訳，『情報を見える形にする技術―情報可視化概論―』，ボーンデジタル，2011.）
[26] 竹本康彦，“ICT とデータビジュアライゼーション，”経営システム誌，**26**, pp. 139–148, 2016.
[27] 立林和夫，『入門 タグチメソッド』，日科技連出版社，2004.
[28] R. A. Boyles, “The Taguchi capability index,” *Journal of Quality Technology*, **23**, pp. 17–26, 1991.
[29] P. B. Patnaik, “The non-central χ^2- and F-distribution and their applications,” *Biometrika*, **36**, pp. 202–232, 1949.
[30] 大谷尚哉，竹本康彦，有薗育生，“工程損失に関する管理図の情報可視化に関する一考察，”日本経営工学会 2018 年秋季大会予稿集，pp. 95–96, 2018.
[31] A. Kanagawa, I. Arizono and H. Ohta, “Design of the $(\overline{x}, s)$ control chart based on Kullback-Leibler information,” *Frontiers in Statistical Quality Control*, **5**, pp. 183–192, 1997.
[32] K Watakabe and I. Arizono, “The power of the $(\overline{x}, s)$ control chart based on the log-likelihood ratio statistic,” *Naval Research Logistics*, **46**, pp. 928–951, 1999.
[33] International Organization for Standardization, ISO 7870-2: 2013 Control charts–Part2: Shewhart control charts, 2013.
[34] 植中隆平，竹本康彦，有薗育生，“ベイズ理論に基づく工程分散の安定性評価に関する一考察，”日本品質管理学会第 121 回研究発表会（関西支部）発表要旨集，pp. 41–42, 2019.
[35] 石濱雅大，竹本康彦，有薗育生，“ベイズ理論と情報理論に基づく工程不良率の安定性評価に関する一考察，”日本経営工学会 2022 年春季大会予稿集，pp. 23–24, 2022.
[36] Y. Okhrin, W. Schmid and I. Semeniuk, “Monitoring image processes: Overview and comparison study,” *Frontiers in Statistical Quality Control*, **13**, pp. 143–163, 2019.
[37] Y. Okhrin, W. Schmid and I. Semeniuk, “New approaches for monitoring image data,” *IEEE Transaction on Image Processing*, **30**, pp. 921–933, 2021.
[38] L. Zuo, L. He and M. Zhang, “An EWMA and region growing based control chart for monitoring image data,” *Quality Technology and Quantitative Management*, **17**, pp. 470–485, 2020.
[39] 角柾人，竹本康彦，“ベイズ理論と情報理論に基づく画像データ上における異常検知に関する一考察，”日本経営工学会 2022 年秋季大会予稿集，pp. 91–92, 2022.
[40] Y. C. Chang and C. M. Chen, “A Kullback-Leibler information control chart for linear profiles monitoring,” *Quality and Reliability Engineering International*, **36**, pp. 2225–2248, 2020.
[41] 加藤慶信，西村崇，山端宏美，“インダストリー 4.0 始まるー製造ビッグデータで現場が変わる，”日経情報ストラテジー，**269**, pp. 22–49, 2015.
[42] 竹本康彦，山口哲司，有薗育生，“入出力特性に基づく工程管理システムの構築，”日本経営工学会論文誌，**56**, pp. 265–276, 2005.

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.