

分業による製品製造における最適化設計

Optimal parameter design for product manufacturing by division of labor

三井 正
(Tadashi MITSUI)

【要 約】

技術者の分業は経営資源の戦略的活用に必須なしくみとして広く普及しており、複雑化を増す製品の開発において、近年更はその細分化が進む傾向にある。一方で、分業の細分化は技術者の仕事のブラックボックス化を招き、分業化されたそれぞれの要素業務の領域間の垣根を高くし、製品全体としての全体最適化の実現に大きな障害となる。このため、製品の全体最適化を達成するためには、個々の要素業務に跨る分業を緩和することが必要である。しかしながら組織的原理が分業の境界を決定する組織的分業では、高度に専門化された要素領域の壁は厚く、分業の緩和は容易ではない。そこで本論文では、分業により分断された二つのシステムが多層構造にあることに注目し、設計対象とするシステムに包括的に認知された階層上位のシステムである包括システムの統計モデルをベースに全体最適化を実施する手法を提案する。本手法により分業のもたらす弊害を乗り越え、従来手法では得られないシステムの創発解を得ることができる。更に、デモ事例をもとに、本手法により得られた創発解と従来手法による従来解とを比較する。

キーワード：分業、パラメータ最適化設計、暗黙知、包括システム、創発性

【Abstract】

Division of labor of engineers as an essential mechanism in the strategic utilization of as management resources has been widely spread. In recent years, subdividing tends to increase in the development of advanced products that increase the complexity. On the other hand, in order to achieve a total optimization of the product properties, it is important to relax the division of labor to lower the barriers between each element task. However, in the organizational division of labor where organizational principles determine the boundaries of the division, since the partition walls between each highly specialized labor area are thick, relaxation of the division of labor is not easy. In this paper, we propose a method to overcome the negative effects brought from the division of labor by a total optimization based on a model proposed for a comprehensive system with fragmented system by the division of labor. Also, based on the demo study, we make a comparison with a conventional solution by the conventional method and an emergent solution obtained by the present method.

Keyword : Division of labor, Optimal parameter design, Tacit knowledge, Comprehensive system, Emergence

1. はじめに

経済学の父、Adam Smithが国富論¹⁾で分業が国の経済発展に不可欠であると説いたのは1776年のことであった。社会経済という枠組みの中での社会的分業はSmithによれば、それがもたらす富裕のためというよりは、そもそも人間の本性に基づく仕組みである。その後、20世紀の初頭に時を移して、経営学の祖と言われるFrederick Taylor (1972)が科学的管理法、いわゆるテイラーシステムにおいて、社会的分業に対する個別的分業という工場労働者の管理方法論としての分業の仕組みを提唱した(前田, 2007)。この仕組みを採用したフォード社による自動車の大量生産はフォード式生産方式と命名された。それはベルトコンベアを用いた流れ作業であり、工場労働者は各人に割り当てられた単一作業をこなすことで生産性が大幅に向上した。以降この分業の仕組みによる大量生産は広範囲な産業分野に適用され社会の経済発展に寄与してきたことは言うまでもない。

テイラー理論による分業の利点は第一に労働効率の向上にある。分業が真に効率向上をもたらすのかについてはスミスの国富論以降様々な議論がなされている(若田部, 1991)が、少なくとも分業が雇用のミスマッチを低減することで構造的失業の対策となり得るというベヴァリッジ理論(永嶋, 2005)によれば労働者と雇用の双方にとってメリットがあることは明らかである。実際、産業の分業化は近年ますます拡大を続け、従来の工場の量産ラインにおける工程的(オペラティブ)分業に留まらず、製品の開発や製造技術を担当する技術者にまで分業化は浸透している。経営者の視点からは利点のみ目立つ分業の仕組みも、労働者側に立ってみれば仕事の全体像を見えにくくし、その結果として、人間の本質的な欲求である仕事のやりがいを損なう可能性がある。この対策として、職務

転換、職務拡大、職務充実といった分業原理の緩和を導入することが古くから提唱(Herzberg, 1978)されている。

技術者の分業の場合、図1で示したように、基本的に組織的(ヒエラルキカル)分業という形態であることが特徴である。この場合においても、工程的分業と同様の状況があることに加え、技術者の組織的分業の長所、短所には、次のような特徴がある。長所としては製品に対する機密情報を分断することで機密漏洩に対するリスクが低下することである。一方、短所としては各人の仕事のブラックボックス化を招き、分業化された各領域の垣根が高くなり、製品の最適化も各領域内の局所的(ローカル)最適化に留まり、製品全体としての全体(トータル)最適化の実現に大きな障害となる。全体最適化は局所最適化の解を積み上げただけでは実現できないことは明白であり、技術者が自分の担当する技術範囲で工程や製品の最適化を目指してもそれが全体としての最終製品の最適化には繋がらない²⁾。工場労働者の工程的分業に対する対策のような、単なる仕事のローテーションでは全体最適化の達成には効果はない。そもそも、技術者の分業は工場労働者よりも各々の分業領域の専門性が高く、仕事のローテーションは容易ではない。例えば、企画部門、研究部門、検査部門といったそれぞれが全く異なった業務内容を持つという水平的分業形態や、それぞれが異なった会社に属し、ベンダー(販売社)とサプライヤー(供給者)の関係にあって上下関係が定まっているような垂直的分業形態では、それぞれの業務が一段と高度に専門化しており、分業の境界を動かすことさえ現実的ではない。

本論文では、分業によって分断された製品開発の場において、上述した技術者の分業がもたらす問題を克服する手法について提案する。次

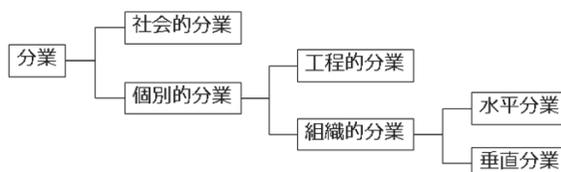


図1 一般的な製品の製造ライン

の第2章では、まずシステムの階層性について、そこで重要な意味を持つMichael Polanyi (2003)の説く暗黙知との関わりについて考察する。議論を進める上で用いるデモ事例について従来の最適化設計による結果と合わせて第3章で説明する。第4章では本論文で提案する包括システムのモデルを用いた最適化設計の結果を示し、従来の最適解と比較したい。第5章で以上の議論をまとめることにする。

2. システムの階層性

システムとはある目的のために要素機能が連結された集合体のことであり(木村, 2015), 本論文では最適化対象となる方法やものをシステムとみなす。製品の製造ラインでは様々な工程を経るが、それら一つ一つの工程を分業の単位としてのプロセスシステムとみなせば、量産ラインは複数のシステムが繋がりを持ったシステム集合体と考えることができる。

2.1 先行研究

最初に先行研究について紹介し、本論文との関係について議論する。高橋(2015a)のHOPE理論はシステムの階層性に着目し、システムの多様な決定構造に対応する。HOPEによる設計では、二つのシステムの間を、実験計画の構造として、従来の内側、外側以外にも、上側という設計単位を定義している。例えば、工場(上位)とその中の複数のライン(下位)という構造を想定し、設計因子の共通化による連合設計によって全体最適を達成することが可能である(高橋, 2014a)。更に、独立連合型という設計単位の独立性が高い場合が議論されており、本論文の主題である分業の弊害に対応する一つの有効な手段である。これらの議論では複数のシステムを統一して扱うことが可能であるが、基本的に一つの実験計画によるデータを単独または結合したデータ構造になっている。

本論文では、同様に複数のシステムを扱うが、各システムはそれぞれ独立した支配原理のもとで機能しており、従ってそれらの統計モデルが類似している必要はない。更に、それぞれのシステムに対する実験計画のデータ構造も同じである必要はなく、後述のデモ事例ではそれ

ぞれが異なっている場合を想定している。

2.2 システムの関連性

ここで二つのシステムの関連性について、その構造に関する二つの観点から考察する。一つは量産工場における前工程と後工程のような時間により、その関係性が記述される構造である。もう一つは製品とその部品のようなシステムの機能の階層性により、その関係性が記述される構造である。前者の場合、一般的に前後の関係と理解されるのに対し、後者では階層の上下の関係³⁾と理解できる。

一方、量産ラインの前工程と後工程といった明らかな前後関係においても、例えば、前工程の出力特性が後工程のシステムの設計因子となるような機能の階層性が存在するのであれば、ここには上下の関係性が見出される。この場合、二つのシステムの間を前工程が下位システムで後工程が上位システムであるということになる。このように、システムの関連性の一意的な分類は困難であるため、本論文においてはこれら関連するシステムの間を分業のあり方によって区別する。即ち、境界に工程的分業がある場合を前後関係、組織的分業がある場合を上下関係と定義する。本論文では技術者の組織的分業にかかる問題を扱うために、システムの機能構造の上下の階層性に注目する。以下でシステムの階層性について考察をすすめる。

2.3 システムの階層性と暗黙知

システムの階層性はPolanyi(2003)の暗黙知の理論⁴⁾において重要な要素である。我々の知の構造は下位レベルの注目から上位の原理である包括的な存在への注目へと移すものであるとした栗本(1988)はこれを層の理論と呼んでいる。

Polanyi(2003)の理論によれば暗黙知とは次々と新しく高次のレベルの認知が形成されていくというプロセスであって、「人間は言葉にできるより多くのことを知ることができる」という生得的な認知能力のことである。Polanyi(2003)は上下関係にある二つのシステムの定義として境界制御の原理、即ち、1) 下位システムはすぐ上のシステムに制限を課す。2) 直

下のシステムが上位システムの支配を免れるとそのシステムは機能しなくなる、に従っているものとした。このように階層性こそがシステムの本質であって、暗黙知とは順々に上位のシステムに至る人間の知の動的プロセスに他ならない。更に、暗黙知によって上位のシステムが下位システムに包括的に認知され、そこに新たな性質が芽生えるとき、それをPolanyiは創発(emergence)と呼んだ。創発とは、様々な学問分野で使われる学術用語であって、あるシステムにおいてその構成要素が独立して機能しているときには見られないが、全体として機能し出したときに発現する特性(現象)のことである⁵⁾(Nicolis and Prigogine, 1980)。

創発により確実に所望の解が得られるというわけではないが、技術者にとって実現可能なオプションとして新しい解の存在を知ることは有効である。しかしながら、人間の生得的な能力とはいえ、暗黙知を働かせなければ創発は出現しないように、パラメータ最適化を実施する場合においても、技術者はいかにすれば創発を実現することができるのかを考えなければならない。

分業の観点から暗黙知の理論を検証すると、Polanyi(2003)では煉瓦職人を例の一つにとってシステム階層性と暗黙知との関係が論じられており、ここに分業の構図を見出すことができる。根底に要素還元主義に対する批判があり、このことは組織分業の弊害として創発が起りにくくなっていくことの警鐘と捉えることができる。

上述の観点から本論文の主題を言い換えると、いかにすれば組織分業の制約を乗り越えて

創発を実現できるのか、ということになる。

3. デモ事例における通常手法による最適化設計

本章では図2に示した、ある装置の回転駆動部に使用されているファインセラミックス部品(以下では単に部品と記する)の製造工程を例にとり、通常的手法による最適化設計について説明する。この事例では二つのシステムが対象になる。一つは装置の回転駆動部であり、もう一つはそこで使用されている部品の製造工程である。ここには装置メーカーと子会社である部品供給メーカーという組織的分業があるため、以下の議論では、装置(の回転駆動部)を上位システム、部品の製造プロセスを下位システムと呼ぶ。

3.1 上位システム(装置の回転駆動部)の最適化設計

装置の回転駆動部の主要特性は摩擦抵抗 Y_{U1} と摩耗 Y_{U2} である。それぞれ、装置の消費電力とMTBFを指標とする装置の信頼性という重要な仕様に大きな影響を及ぼす。部品の強度はこれらの特性に効果が大きいと予想されるため、設計因子 $X3$ とする。(ここで $X3$ としたのは、後述の部品製造プロセスの設計因子を $X1$ 、 $X2$ としたためで、大きな意味はない。)他の設計因子としては、回転軸にかかる圧力 $X4$ と潤滑剤の種類(A, B)の $X5$ とが固有技術の知見をもとに選定された。更に、この装置の稼働環境として周囲温度 Z_U が攪乱因子として特性 Y_{U1} に作用することが既知であって、この対策が重要な課題であった。そこで、装置の設計者は所望の装置特性を達成すると同時に周囲温度に対

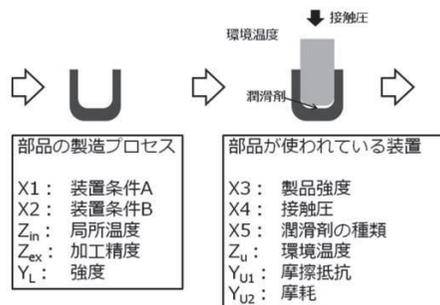


図2 本事例における二つのシステム

するロバスト最適化を達成するために必要な部品の強度を、実験計画によるパラメータ最適化により求めることにした(河村・高橋, 2013)。尚、この実験において部品強度X3は装置メーカー側では制御できない因子ではあるが、この実験のために複数の試作品の強度を測定し、実験の水準値にある部品を実験用に抜き取るという操作を実施している。この設計では、特性 Y_{U1} , Y_{U2} をそれぞれの攪乱因子の変動平均を最小化し、変動範囲を0に制約するという定式化のもとに求解することになる。最適化のためのデータの統計処理には統計計算ソフトであるJMP® 12 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)を使用し、bic基準を採用したステップワイズ法による変数選択で統計モデルを作製した。図3にこの最適化の緒元とそこで得られた解をまとめておく。最適化設計はJMPの最適化設計アドインであるHOPEアドインを使用した(Takahashi, 2003)。このアドインでは、条件設定の右側部に特性の仕様を入力した上で、ここには表示されていない最適化ボタンを押すことで、設計/制御因子の部分に最適解と条件設定の左側部に特性の推定値が出力される。

この結果から、摩耗に対しては変動幅を0にはできないまでも、実質的にはほぼロバストになる解があり、そのときのX3の値は約1.38であることがわかった。ここでは両方の特性の最小化を設計条件においているが、実際には摩擦抵抗と摩耗とはそれぞれ一定の値以下であれば装置性能には問題はない。更に、ロバスト性においても、必ず変動幅を0にしなければならないというわけではない。しかしながら、どこにタ

ーゲットを置くべきは、消費電力やMTBF等のメーカーとして保障する装置性能によって定まるものである。明確な装置の要求仕様なくして、設計者が勝手に設定することはできない。更に、そのためのデータを取得する必要もあり、その手間を考えると、開発の初期段階では、まずはできるだけ理想的な特性を目指すということを設計のスタートに置くことは理にかなっている。もちろん、このことが部品の製造プロセスに与える影響はこの時点では認知されていない。従って、装置最適化で得られたX3の値、1.38をもとに従来の管理幅0.5をもとに部品強度の管理上下限(USL, LSL)の仕様がLSL = 1.38, USL = 1.88と仮に決定され、寸法等のその他の仕様とともにして部品製造メーカーに伝えられた⁶⁾。

3.2 下位システム(部品製造工程)の最適化設計

部品供給メーカーの技術者は直ちに新しい仕様に対応すべく部品の製造プロセスの検討に着手した。ここで一般的なファインセラミックス部品の製造工程の一部を図4に示す。最初に調合工程で原料であるアルミナ等の構造材やチタン酸バリウム等の機能材が粉剤、混合される。この後に加圧装置による成形工程で部品の形状が定まり、次の焼成工程で部品の特性とし重要な強度が定まる。従って、部品強度 Y_L の仕様を達成するためには焼成工程の装置パラメータX1, X2の最適化が重要である。焼成工程では従来、二つのばらつき要因による強度ばらつきが歩留りを低下させていた。一つは焼成工程外の

条件設定							
予測変数	目標	以上	以下	重み	推定値	信頼下限	信頼上限
摩耗(範囲_摩耗)	<input type="text" value="制約"/>	0	0	100	0.01580 #		
摩耗(平均_摩耗)	<input type="text" value="最小化"/>	.	.	1	0.38922	0.07682	0.70163
摩擦抵抗(範囲_摩擦抵抗)	<input type="text" value="制約"/>	0	0	100	0.00000		
摩擦抵抗(平均_摩擦抵抗)	<input type="text" value="最小化"/>	.	.	1	3.33900	-0.22423	6.90223
設計/制御因子							
設計/制御因子	設計値	ロック	最小	最大	間隔		
X3	* 1.3782479382	<input type="checkbox"/>	0.5	5	.		
X4	* 27.465765691	<input type="checkbox"/>	10	30	.		
X5	* B	<input type="checkbox"/>					

図3 上位システムの最適設計

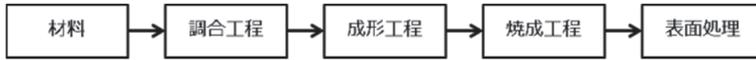


図4 一般的なファインセラミックスの製造ライン

前工程における機能材の粒子径のばらつきであって、もう一つは焼成工程内における、焼成炉内に置かれる部品の位置の違いによる局所的な温度ばらつきである。従って、焼成工程において、これら二つのばらつき要因はともに部品特性の安定性には好ましくない要因であるから、この二つを攪乱因子 Z_{ex} 、 Z_{in} としてロバストパラメータ設計が適用可能である。攪乱因子とは一般的に量産の場では制御不可であるが、実験の場においてのみ何らかの手段で制御可能な因子である。実験の場における攪乱因子の制御にはいくつかの方法があるが、この実験では、原料の粒子径についてはフィルタ工程を追加して粒子径を揃え、炉内の局所的温度に対しては、焼成される部品の炉内の位置を固定することで対応した。これらの制御は原理的には量産の場であっても可能である。しかしながら量産時にこれらの手段を実施するのは、追加工程による大幅なコストアップやスループット低下による生産性の低下をもたらすため現実的ではない。この実験では、両者の攪乱因子は量的因子として扱えることに注目し（高橋，2014b）（高橋，2014c），これらのばらつきの影響を押さえつつ、所望の部品強度を達成するための焼成工程のロバストパラメータ設計を実施する。この実験では、実験数削減のために攪乱因子を内側に割り付け、攪乱因子が関与する高次の交互作用

を計画作成の仮定モデルに取り込んだ最適計画を採用した。この計画から作られる統計モデルにおいては設計因子と攪乱因子との区別はされないため、Takahashi（2015）により提唱されている柔軟型設計によりロバスト設計に際してモデルの因子を攪乱因子に割り当てた。

図5にこの設計の定式化と、これらの定式化のもとに得られた解を示している。残念ながら、二つの攪乱因子 Z_{ex} 、 Z_{in} の現状のばらつきを許容できる解は無いことが判明した。即ち、与えられた部品強度の仕様を満たすためには二つの攪乱因子のばらつきを何らかの方法で制限しなければならない。一つの案として、三井（2015）は実験データから得られた特性の応答関数の統計モデルをベースした関連する工程の担当者間でなされる技術的交渉によって合意形成を目指し、準解としての落としどころを見出すという現実的なアプローチを提案している⁷⁾。次章ではこのアプローチ以外に、抜本的な解決策を探るため、上位システムの装置システムに視点を移して議論を進める。

4. 包括システムと創発解

2章で二つのシステムの関係性について議論し、そこで、二つのシステムの境界に工程的分業がある場合を前後関係、組織的分業がある場合を上下関係と定義した。一般に、実験計画で

条件設定						
予測変数	目標	以上	以下	重み	推定値	信頼下限 信頼上限
Pred Formula Y(RNG)	制約	0	0	100	2.40216 #	
Pred Formula Y(MID)	制約	1.3782479382	1.3782479382	100	1.84647 #	
Pred Formula Y(MIM)	なし	-	-	-	0.64539	
Pred Formula Y(MAX)	なし	-	-	-	3.04754	
設計/制御因子						
設計/制御因子	設計値	ロック	最小	最大	間隔	
X1	* 0.6774897191	<input type="checkbox"/>	-1	1	-	
X2	*	<input type="checkbox"/>	-1	1	-	
Zin	0	<input type="checkbox"/>	-1	1	-	
Zex	0	<input type="checkbox"/>	-1	1	-	

図5 下位システムの最適設計

は両方のシステムの実験の場を統合することで、統合システムとしての全体最適化が可能である。(高橋, 2014a) これは前後関係にあるシステムでは、実験に必要なリソースは増大するものの、原理的には実施可能である。一方、上下関係にあるシステムの場合においては、明示的な分業構造を持つ組織的分業では実験の場を統合することは困難である。例えば、製品の設計と製造とではそれぞれが異なった会社組織に属することも珍しくなく、例え同一会社であっても分業の壁は厚いのが通常である。更には開発フローの上流と下流とではクリティカルな仕事のスケジュールが異なるため、実験の場を統合することは現実的ではない。このような場合、通常最適化のフローでは前章で見たように、最初に上位システムの最適化が実施され、その結果を踏まえて下位システムの特性に対する制約が仕様として決定される。この仕様をもとに下位システムの最適化が実施されるという上から下への指示という情報の流れをとまう。

ここで、技術者が下位システムから上位システムへと視点を写し、暗黙知を働かせて上位システムを包括的に認知したとする。この新たに認知されたシステムをPolanyiにならい包括システムと呼ぶことにする。本章では前章で用いたファインセラミックス部品の製造工程とその部品が使われる装置との上下関係にあるシステムから包括システムを作成し、そのシステムの最適化を試みる。図6に二つのシステムが包括されたシステムの機能構造図を示す。

4.1 包括システム

二つのシステムは下位にある製造工程の特性である部品強度が上位システムの装置では設計因子となり、上位での特性である摩擦抵抗と摩擦とに影響しているという関係になっている。この多層構造を構成するそれぞれのシステムが支配される諸原理は、それぞれのシステム内の実験データから得られた統計モデルである、 $y_L = x_3$ が二つのシステムの境界となる。

以下、Polanyi (2003) の理論に従って議論をすすめる。まず、上位の装置、下位の部品製造工程のそれぞれのシステムはともに実験で得られたデータに基づいて推定された統計モデル $f(x)$ 、 $g(x)$ に支配⁸⁾ されている。ここで、上位システムはその両方のモデルの支配下にある。しかしながら、下位システムを支配する諸原理である統計モデル $f(x)$ は上位システムの存在を意味付ける基盤となるが、上位システムを全面的に支配することはない。上位システムの存在には下位システムを支配する諸原理とは異なった原理である統計モデル $g(x)$ が不可欠である。この上位システムと下位システムとの間の境界条件は上位システムの統計モデルが決定する。従って、この部品を用いた装置の最適化には下位システムの最適化のみでは不可能であり、上位システムの「意味」への持続ダイナミズムである暗黙知が不可欠である。このように、本事例はPolanyi (2003) の理論が適用できることがわかる。

本事例の場合、二つのシステムを統合した包

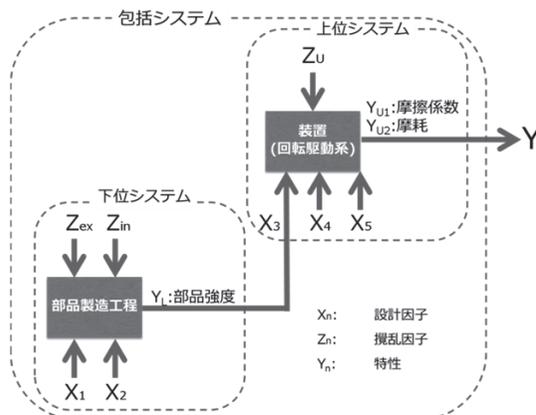


図6 包括システムの機能構造図

括システムを支配する原理は形式的に上位、下位の統計モデル $f(x)$ 、 $g(x)$ から容易に導出できる。実験の場は異なっているとはいえ、その統計モデルを開示してもらうことは、利害関係が一致するステークホルダー間では比較的容易である。ここでは、子会社の部品メーカーの技術者が、従来の最適化手法では部品の製造プロセスとして満足する解がなかったため、部品強度の仕様の根拠となった統計モデルを親会社である装置メーカーから取り寄せたというストーリーを想定する。分業の垣根を統計モデルという情報が超えることになる。

4.2 包括モデル

しかしながら、ここで $f(x)$ は統計モデルであるため、そこには統計誤差が含まれていることに注意しなければならない。今、簡単のため下位システムの統計モデル $f(x)$ が二つの設計因子のみの線形式(1)で記述できるとする。

$$\begin{aligned} y_L &= f(x_1, x_2) + \varepsilon \\ &= c_1 x_1 + c_2 x_2 + \varepsilon \end{aligned} \quad - (1)$$

一方、上位システムの統計モデル $g(x)$ も同様な線形式

$$\begin{aligned} y_U &= g(x_A, x_B) + \lambda \\ &= d_A x_A + d_B x_B + \lambda \end{aligned} \quad - (2)$$

で表せるとする。ここで、下位の特性因子 y_L が上位システムでは設計因子 x_1 になっているとすると、 $x_1 = g(x_A, x_B) + \lambda$ であるから次の(3)が得られる。

$$\begin{aligned} y_L &= f(x_1, x_2) + \varepsilon \\ &= c_1 (d_A x_A + d_B x_B + \lambda) + c_2 x_2 + \varepsilon \\ &= c_1 d_A x_A + c_1 d_B x_B + c_2 x_2 + (\varepsilon + c_1 \lambda) \end{aligned} \quad - (3)$$

(3)式は包括システムの統計モデルと見做せ、それを包括モデルとする。包括モデルはキメラ⁹⁾のように上位と下位のモデルの遺伝子を備えたものであって、その実態は $\varepsilon + c_1 \lambda$ という複合分布の誤差を持つ統計モデルである。実

際の事例では設計因子の水準値もばらついているため、モデルの統計誤差とは見かけ上はそもそも区別できないものの、数理的にはこの統計モデルは畳み込み手法で推定する必要がある。実務的には、例えば、モンテカルロシミュレーションのような現実的な手法も採用可能である。

4.3 統計誤差 ε が存在しない場合の包括モデルのパラメータ最適化

シミュレーション実験を始め、モデルの精度が高く統計誤差が無視できる場合は実際の事例としては珍しくない。そこで、本論文では包括モデルを研究する端緒として、まずは下位システムの統計モデルの統計誤差 ε の存在が無視できる場合について考察を進める。構造と誤差とで構成される統計モデルにおいて誤差がないということは、その数式は単なる構造を示す関数として扱われることになる。従って、 $\varepsilon = 0$ として、(3)式は、

$$\begin{aligned} y_L &= c_1 d_A x_A + c_1 d_B x_B + c_2 x_2 + c_1 \lambda \\ &= h(x_A, x_B, x_2) + \lambda \end{aligned} \quad - (4)$$

と書き表される。(4)式は基本的に設計因子が単純に増えた場合と同じに扱えるため、複合分布の誤差を持つ統計モデルについての厳密な議論を回避することができる。

本事例では、部品工程である下位システムの統計モデル $f(x)$ は、寄与率が93%と高く、誤差の平方和MSEも大きくはないことが判明しているため、誤差は無視できるほどに小さいとみなし、(4)式のもとでパラメータ最適化設計を実施する。

この包括モデルに対する定式化とそのもとに最適解を求めた結果を図7に示す。この解は従来の上位、下位を独立に最適化した際には得られない解である。即ち、両方のシステムを包括して初めて出現したシステムの状態であり、従って、従来の手法に依る従来解に対して、この解をPolanyiの創発に倣って創発解とする。創発解においても、残念ながら、 Z_{ex} 、 Z_m のばらつき幅の制約無しには所望の部品強度は得られない。しかしながら、表1に見るように両者の解

条件設定						
予測変数	目標	以上	以下	重み	推定値	信頼下限
予測式 Y(予測式 Y(RNG))	制約	-	0	99999	1.56162 #	
予測式 Y(予測式 Y(MID))	なし	-	-	-	3.09549	
予測式 Y(予測式 Y(MIM))	なし	-	-	-	2.31468	
予測式 Y(予測式 Y(MAX))	なし	-	-	-	3.87630	
摩耗(範囲_摩耗)	制約	-	0	100	0.09213 #	
摩耗(平均_摩耗)	最小化	-	-	1	1.86108	
摩擦抵抗(範囲_摩擦抵抗)	制約	-	0	100	0.60160 #	
摩擦抵抗(平均_摩擦抵抗)	最小化	-	-	1	39.97252	
設計/制約因子	設計値	ロック	最小	最大	間隔	
X1	* 0.6273018477	<input type="checkbox"/>	-1	1	-	
X2	* -1	<input type="checkbox"/>	-1	1	-	
X4	* 30	<input type="checkbox"/>	10	30	-	
X5	* A	<input type="checkbox"/>				

図7 包括システムの最適設計

表1 創発解と通常解との比較

	通常解	創発解
X1	0.68	0.63
X2	1	-1
X3 (平均, 範囲)	1.38 ←-1.84,2.4	3.10, 1.56
X4	27.5	30
X5	B	A
Zin,	-0.5 - 0.5	-0.5 - 0.5
Zex		-0.4 - 0.4
摩耗 (平均)	0.39	0.09
摩耗 (範囲)	0.02	1.86
摩擦抵抗 (平均)	3.34	39.9
摩擦抵抗 (範囲)	0	0.6

は明らかに性質の違うものであり、これは上位システムが多目的システムである故の応答関数の多峰性に由来すると推察できる。

ここで得られた創発解に対して、前章で得られた解を従来解と呼ぶことにする。両者の違いを比較するために、いかなる攪乱因子のばらつきを許容すればそれぞれの仕様範囲内に収まるかを応答関数の等高線マップを用いて議論する。前節で見たように、創発解においても現状では部品強度を所望の範囲即ち、LSL=3.09, USL=3.59を満たす解は存在しないことが判明したものの、攪乱因子、Z_{ex}, Z_{in}とを一定の変動幅に狭めることで何とか部品強度を仕様内に収めることができることが判明した。実験計画において、Z_{ex}, Z_{in}の水準範囲、LSL: -1, USL: 1は現状の工程のばらつきにおける実際の値とした。このため、焼成工程の担当技術者は技術的

にばらつきZ_{in}を低減する方法を模索した。その結果、Z_{in}に対しては焼成炉の温度分布を別の最適化実験によって水準幅を2から1に縮小することができた。このときの要求されるZ_{ex}の範囲を従来解、創発解のそれぞれについてそれぞれ図8及び図9に図示する。ここで、Z_{ex}が最小になるように、従来解ではZ_{in}に対し、LSL: -0.5, USL: 0.5, 創発解では、LSL: -0.8, USL: -0.2に設定した。

このデータをもとに、調合工程の担当技術者と交渉したところ、現在は複数の原料の調合先を1社に絞ることで原料の粒子径を-0.4から0.4の変動幅に収めることは可能であるとの結論に達した。即ち、創発解であれば、攪乱因子のばらつき低減のための工程改善を前提に、部品強度として所望の仕様を達成することができる。この結果は上位システムの装置設計者に伝

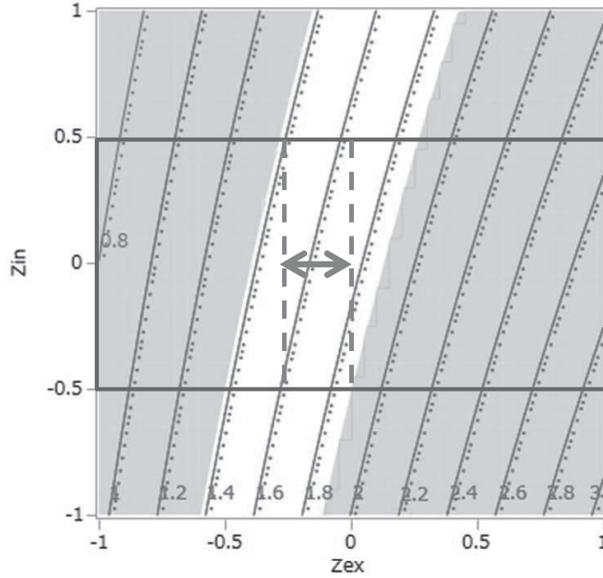


図8 通常解の等高線図

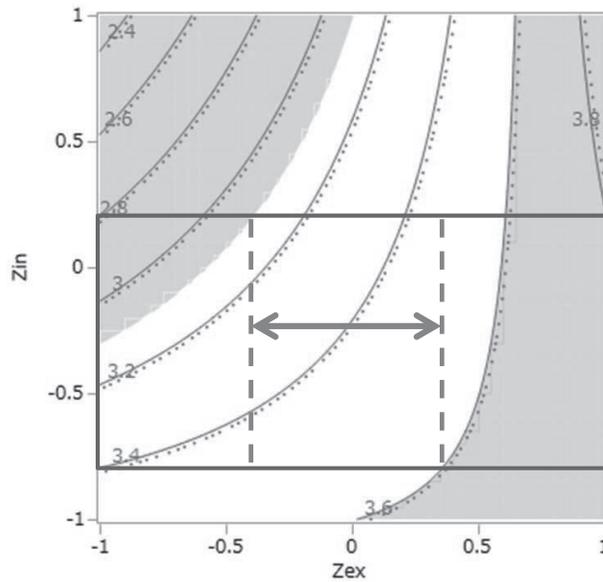


図9 創発解の等高線図

えられた。摩擦抵抗の平均値が大幅に増加することが懸念されたものの、以下の点で創発解は評価された

1. 摩擦についてはむしろ小さく、摩擦抵抗についてもぎりぎり装置仕様をみたすこと。
2. 潤滑材がより安価なAでよいこと。
3. 何よりも、従来解では歩留りが低いため大幅なコストの増加が見込まれること。

そもそも無理な要求を部品メーカーに突き付けて、それが故に部品のコスト上昇を招き、あるいは装置のコスト少々に繋がるという状況は好ましくない。このように攪乱因子のばらつき低減を前提とはするが、創発解を採用することで最低限の装置仕様を満たしたうえで全体のコストを抑えることが可能となる。

この例では、創発設計により解が得られるよ

うに状況を設定した。このため、解の有無はもとより、そもそもどちらの解が優れているのかという議論に意味はない。ここで大事なことは、両方のシステムの支配原理より導出した包括モデルを包括システムの支配原理と見做すことで、上位、下位を独立に最適化する従来の手法では得られなかった創発解が出現することにある。創発解がより良い解であるかは、単純には判断できないものの、何らかの有益な解が見つかったならば、再現実験による検証を前提としてその解を採用することは、現実的アプローチとして妥当であると考えられる。

4.4 従来手法に対する優位性

2.1では先行研究について述べたが、ここでは二つの上下関係にあるシステムを最適化する従来手法に対して本論文の提案する手法が持つ優位性についてより一般的な観点から述べる。

二つの関連するシステムを実験計画により全体最適化を試みる場合、従来次の二つの手法が一般的である。

- a) 二つのシステムを同じ実験の場に持ち込み、すべての設計因子を実験計画に割り付ける。
- b) 上位システムの局所最適化を実施し、その制約内で下位システムの局所最適化を実施する。

上記 a) はその適用に制約が大きいものの、制約がなければ当然ながら最良である。制約の一つは実験数に制約がある場合である。一つの実験に多くの設計因子を持ちこむと実験数が増大してしまう。このため、手法 a) を全体最適化の目的で採用することは現実的でない。もう一つの制約として、特に組織的分業の場合、通常は二つの関連しているシステムを同じ実験の場で扱うことは困難であるという状況もある。これ以外にも、空間的あるいは時間的に実験の場を共有できない場合は多々ある。例えば、上位システムの最適化に実実験の困難さ故にコンピュータシミュレーションが用いられる一方、下位システムの最適化は現象の複雑さから実実験によらなければならない場合がある。この場合、両システムを空間的に同じ実験の場に持ち

込むことは不可能である。

手法 b) は組織的分業の制約がある場合に有効な手法として3章で詳細に説明したように、手法 a) が採用できない状況において有効である。しかしながら、手法 b) による設計解は厳密には全体最適化にはなっていない。更に、上位システムの最適設計に長い時間が必要である場合、その場での最適化を待たずに、下位システムの最適化に着手しなければならないケースがある。この場合、両方のシステムの最適化を引き続いて実施する必要がある手法 b) は採用できない。

このような従来手法の問題点に対し、本論文で提案した手法では、独立した実験の場で得られたそれぞれの統計モデルから包括的統計モデルを導出することで、従来手法が採用できない状況でも実験計画に基づく最適化設計を可能とする。例えば、独立した二つの実験において、既存のデータが入手できさえすれば時間的、空間的な制約を受けずに全体最適化を試みる事が可能である。本手法により所望の解が得られるだけでなく、各々を独立してパラメータ設計することでは得られない新たな最適解が見つかる可能性がある。

5. 結論

本論文では、組織的分業に分断された二つの関連するシステムの最適化について考察した。このようなシステムの全体最適化では、技術者がより上位または下位の階層へと視点を変えてシステムを観察し、上下に存在するシステムを多層構造として認識することが重要である。従来これらの多層構造のシステムは独立に最適化され、下位システムは上位システムの最適解の制約下で局所最適化されるに留まっていた。これに対し、上位のシステムが下位システムに包括的に認知された包括システムとして扱うことを提案した。具体的には、二つのシステムのモデルを結合した包括モデルを用いて最適設計を試み、従来では見えなかった新たな性質（創発性）が最適解として得られることを示した。

冒頭で述べたSmithの国富論では、人は自分だけの安全と利益だけを求め、全体を見通した行動をせずとも「見えざる手」により人が全く

意図していなかった社会全体としての利益が達成されるとした。しかしながら、分業により分断された個々のシステムを利己的に最適化しても、全体最適化を達成できない。そこに「見えざる手」が存在しないからである。一方で、人間の持って生まれた認知能力である暗黙知が働くとき、上位のシステムへと包括したシステムが認知され、その最適化によって創発的な全体最適がもたらされる可能性がある。この意味では暗黙知こそ「見えざる手」に他ならないといえよう。

本研究では包括モデルの基本的な考え方を議論するために、下位システムには誤差 ε が存在しないという仮定のもとで議論を行った。しかし現実の場では下位システムに誤差 ε が存在し、しかもそれが大きいという場合も少なくはない。これらを踏まえた現実的な議論を行うことが今後の課題である。

【引用文献】

- Taylor, F., 上野陽一訳, 1972, 『科学的管理法』産業能率短期大学出版部
- Herzberg, F., 北野利信訳, 1978, 『能率と人間性』東洋経済新報社
- 河村敏彦・高橋 武則, 2013, 『統計モデルによるロバストパラメータ設計』日科技連出版社
- 木村英紀, 2015, 『世界を動かす技術思考』講談社
- 栗本慎一郎, 1988, 『意味と生命 — 暗黙知理論から生命の量子論へ』青土社
- 前田淳, 2007, 「「テイラーシステム」の構築とその意義 (1)」三田商学研究50 (2) : 109-115
- Mitsui, T. and Takahashi, T., (2014), An approach for robust parameter design using a cost effective experimental design, Proc. of International Conference on Quality '14 Tokyo, proceeding
- 三井正, 2015, 「統計モデリングを用いた合意形成」, 目白大学経営学研究13, 47-59
- 永嶋信二郎, 2005, 「W・H・ベヴァリッジ「失業論」の思想的背景と失業調査」海外社会保障研究151 : 126-132
- Nicolis, G. and Prigogine, I., 1980, 『散逸構造：自己秩序形成の物理学的基礎』岩波書店
- Takahashi, Takenori, (2003), Regression Analysis by Crossed Array Experiment, Proc. of the 32nd International Conference on Computer and Industrial Engineering, 259-264
- Takahashi, T., (2015), Proposal of Flexible Design and its Application, Proc. of the Asian Network for Quality Congress 2015 Taipei, Proceeding, 1-10
- 高橋武則, 2014a, 「超最適化による調和設計」, 目白大学経営学研究12, 73-111
- 高橋武則, 2014b, 「柔軟設計を用いた量的攪乱因子への対応」, 日本品質管理学会第105回研究発表会発表要旨集, 29-32
- 高橋武則, 2014c, 「頑強設計における多種のアプローチと内乱への対応」, 日本品質管理学会第44回年次大会研究発表会発表要旨集, 221-224
- 高橋武則, 2015, 「設計のマネジメント」, 目白大学経営学研究13, 61-87
- Polanyi, M., 高橋勇夫訳, 2003, 『暗黙知の次元』ちくま学芸文庫
- 若田部昌澄, 1991, 「アダム・スミスの分業論」早稲田経済学研究33 : 97-109

【注】

- 1) この歴史的な著作はインターネット上で原文が公開されている。例えば, http://www.ibiblio.org/ml/libri/s/SmithA_WealthNations_p.pdf.
- 2) 「見えざる手」に頼って楽観できるほど現実には甘くないのである。
- 3) Polanyi (2003) は上位, 下位という関係性に対して近位と遠位という主体者からみた距離による関係性を意識した表現も用いている。
- 4) 因みに, この暗黙知という用語は徒弟制度に根ざす日本的経営の特徴的キーワードとして使われるケースが散見される。しかしながら, Polanyiの説くように暗黙知の「知」が理論的知識 (knowing what) ではなく, 実践的知識 (knowing how) を意味するものであることを考えれば, 上述の暗黙知の使い方は誤用であると考えべきである。
- 5) 例えば, 水の分子が独立して運動している状態からは予想もできない相転移という現象が, ある一定の温度, 圧力下で発生することは周知である。その他にも, 蟻の行列などの生物現象, 交通渋滞などの社会現象をはじめ自然界の様々な局面に出現する。因みに, このPolanyiの思考実験によって予見されたシステムの創発性は, このうち1977年にノーベル化学賞を受賞したIlya Prigogineの散逸構造の理論における自己組織化としてその存在が証明されたことになる。

- 6) 複数のステークホルダーが絡む問題解決にあたっては、本来は交渉による合意形成が望ましいものの、ここではサプライヤーと装置ベンダーとの力関係のもとでの指示という従来ながらの形態となっている。
- 7) 本論文は、International Conference on Quality '14, 10/20/2014, 東京において発表された。
- 8) 厳密に言えば、支配されている原理が統計モデル $f(x)$ および $g(x)$ として推定されたということになる。
- 9) キメラとは生物学において同一個体内に異なった遺伝子情報を持つ個体を指す学術用語である。もともとはギリシア神話のキマイラ (Chimera) というライオンの頭と山羊の胴体に毒蛇の尾を持つという想像上の生物の名である。