

# 統計モデリングを用いた合意形成

## Consensus building Using Statistical Modeling

三井 正  
(Tadashi MITSUI)

### 【要 約】

技術開発におけるパラメータ最適化設計では、単純に最適解が得られない状況にしばしば直面する。このような場合は、それに準ずる解である準解で妥協せざるを得ない。この際、準解を導出する過程が重要である。特に、複数の特性を扱う多目的最適化ではステークホルダーにとって何が最適であるかを定義した上で、誰にとっての最適を優先するかを決定する必要がある。この過程ではステークホルダー間の競争が生まれ、製品の最適設計に障害となる場合がある。この場合の合意形成の手段の一つとして調和設計が提唱されている。一方、単特性の最適化であっても、最適解が得られなかった場合の準解の導出にはステークホルダー間の合意形成が必要になる場合がある。本論文では、量産工場の製造ラインにおける製品のロバスト最適化を題材にとり、統計モデリングを用いた合意形成にいたる技術的交渉の過程をいくつかのシナリオにそって議論する。

**キーワード**：技術的交渉，パラメータ設計，最適計画，統計モデリング，合意形成

### 【Abstract】

In parameter optimization design for technology development, we often have faced the situation where the optimal solution is not obtained simply. In this case, we cannot help accepting the quasi-solution as the next best. Knowing the deriving process for the quasi-solution is more important for us than getting the solution. Especially, in the case of multi-characteristic optimization, we have to define what is best for a stakeholder. Also it is necessary to determine the priority for everyone. In this process, there might be a conflict among stakeholders and it may become an obstacle to the optimal design for the best product. Harmonic design has been proposed to build consensus in this case. However, even in the case of an optimization of single characteristics, consensus building between stakeholders is needed to derive the quasi-solution when the optimal solution is not obtained. In this paper, taking the theme of robust optimization of products in the production line of mass-production factory, the process of technical negotiations to build the consensus using statistical modeling will be discussed along the several scenarios.

**Keyword** : technical negotiations, parameter design, optimal design, statistical modeling, consensus building

## 1. はじめに

ものづくりの現場である量産工場では、製品は様々な工程を経て製造されている。従来、所望の製品特性を実現するための製造ラインの最適化はこれらの工程の一つ一つに対して個別に実施されてきた。それぞれの工程を担当する技術者にとって、担当工程の最適化は製品特性の改善と引き換えに工程内の製造条件等に制約をかけることに他ならない。即ち、無数にある製造条件の組み合わせの中で、製品特性のスペックを満たす条件を探すことが最適化ワークの本質である。

小規模な生産ラインでは複数の工程を同一の技術者が担当する場合もあるが、近年の複雑かつ大規模化している生産ラインではそれぞれの工程を担当する技術者が異なっていることがむしろ普通であろう。それどころか、生産ラインが異なる工場に股がり、コミュニケーションが容易にとれない状況であったり、更には関係する技術者が異なった会社に属する場合も珍しくない。

このようなケースでは、多数のしかも利害のベースが異なったステークホルダーのもとでの最適化設計を目指す必要があるのは言うまでもない。高橋により提唱されている調和設計はこのような状況下での有効なアプローチである。<sup>[16][18][8][19][20][21][22]</sup> 調和設計では多特性の製品における多目的最適化が前提とされているが、一方で単特性の最適化であっても、最適解が得られなかった場合の準解の導出にはステークホルダー間の合意形成が必要になる場合がある。本研究では調和設計の考え方についてさらに考察をすすめ、ロバストパラメータ設計において、技術的な交渉をベースとした最適化のアプローチについて提案する。

## 2. 技術的交渉の背景

価値観の異なった多数のステークホルダーが存在する状況では、例え一同が高品質な製品の製造（及びそれによる利益の増大）という同じ目標を共有しているとしても、それぞれの技術者は自らが関与する工程を他の工程に対して優先することは当然であり、責めを負うべきものではない。この状況では、担当技術者間で競

合が発生する。具体的には、工程の製造条件に対する制約は緩い方が管理が楽であるため、製品特性を確保するための代償としての工程の制約という不利益を関係者間で押し付け合するという事態に陥ってしまう。工程にかかる制約を工程の自由度という言葉に言い換えてみると、製品特性を実現するために、許された製造条件の自由度を複数の工程間で喰い合うという状況はいわゆる「コモンズの悲劇」に他ならない。

コモンズの悲劇とは誰もが自由に利用可能（オープンアクセス）な場である共有地（コモンズ）における多数の利用者の競合がもたらす荒廃（の法則）を意味している。1968年に複数の農民が牧草地に牛を放牧するという思考実験によってGarrett Hardinにより発表された。<sup>[2]</sup>

上述の状況がこの法則に従うのであれば、製品の製造条件の自由度を担当技術者同士で奪い合い、最終的に製品設計を硬直させ、荒廃させることになりかねない。この状況を如何に克服するか考えるために、コモンズの悲劇についての各方面での研究が参考になる。近年、コモンズの悲劇は越境公害という多国間における環境問題を論じる際に引き合いに出されることがある。日本でも中国の大気汚染に原因があるとされるPM2.5の健康への影響が懸念されている。このケースにおけるコモンズはむしろ地球であり、各国が自国の経済という牛を肥やすために他国の迷惑を顧みなくなれば地球が荒廃して行くのは自明の理であろう。

それではコモンズの悲劇を阻止するにはどうすればいいだろうか。コモンズの悲劇が起こる状況を考察することが一つの鍵となる。即ち、1) コモンズにおけるステークホルダーの権利が排除可能であり、かつ2) ステークホルダー間の競合が大きい、という二つの条件が合わさった場合にはじめて悲劇となる。この考察から、コモンズの悲劇の背後にはステークホルダーの意識あるいはモラルの荒廃があって、それによりコモンズの悲劇がもたらされることが予期される。従って、ステークホルダーが利己的な利益追求を超えて、全員でコモンズをケアして行くという意識が重要であるという主張がある。確かに、こうすることでステークホルダーのモラルの向上に繋がることは間違いない。し

かしながら、利己的な利益追求を超えるという意識を自覚できるようになるまでには、やはり何らかの裁判なり調停なりが必要であろう。

環境問題の考察からは、複雑なシステムでは全体の中での自らの行動の効果の予測が困難であるという問題も見えてくる。例えば、地球温暖化の対策が叫ばれている中、オランダでは政府主導でバイオ燃料が用いられるように発電所の改造を促す政策がとられた。このため、バイオ燃料の一つであるパームオイルの需要がヨーロッパで拡大し、そのことがインドネシアに様々な変化をもたらした。熱帯雨林の伐採や化学肥料の増大、更にはパームヤシの栽培面積確保のために湿地を排水して泥炭を燃やしたという。このことがインドネシアを世界第三位のCO<sub>2</sub>排出国にしてしまった。この事例をもとにヘンリー・ペトロスキーは地球全体に正味の利益をもたらすには世界を一つのシステムとみなしたシステムエンジニアリングの手法が必要であると説いている。<sup>[3]</sup>

上述したアナロジーをベースにすると、本研究で考察する製造ラインの最適化という技術開発においては、プロセスの個別最適化ではなく、ライン全体を一つのシステムと見なした上で、ステークホルダー間の交渉が必須と考える。交渉に関する技法は、従来の単なるレトリックの技法を超えた交渉のための戦略としてハーバード・ロースクールにおけるロジャー・フィッシャーの手法がハーバード流交渉術として紹介されている。<sup>[8]</sup> 近年では、交渉学として学問の枠組みの中でステークホルダーの合意形成の方法論として研究され、関連書籍も多数出版されている。<sup>[4][5]</sup>

この一方で、技術開発における交渉は科学的なベースに則って実施されるべきである。次章

以降では、最適化の対象を複数の工程によるシステムと捉え、工程間の交渉という技術的側面からコモنزの悲劇に如何に打ち勝っていくかについて、具体的なアプローチを示しながら議論する。

### 3. モデル製造ラインと最適化の定義

#### 3.1 ロバスト設計

モデルとする製造ラインについて説明する前に、製造ラインにおけるロバスト問題について考察しておく。一般的な製品の量産では、図1に示すように数多くの工程を経る。この図では $X_n$ は設計因子を、 $Z_n$ は誤差因子を示しており、これら無数の因子の効果が複合されて各工程の出力に影響を与えている。ある工程の出力は基本的に次工程の入力となり、複数の工程が数珠繋ぎになっているという構造になっている。製造工程では数多くの誤差因子が存在しており、所望の特性に対してその影響を低減することが製品の量産には必須である。このため、製品の製造工程における（特にプロセスパラメータのばらつき等についての）ロバスト設計は、その重要性は認識されているにも関わらず、実施されることが少ない。なぜ技術者がロバスト設計を躊躇するのかその理由を以下のように推測している。

a) 従来、ロバスト最適化ではそれぞれの工程を独立にその対象として扱うことがなされてきた。<sup>[6][7][10][11][12][14][15]</sup> しながら、個々の工程のロバスト解を寄せ集めたとしても、それがロバストな製品を製造する解とはならない。例えば、最適なボディに最適なタイヤとエンジンを搭載した自動車が最適なものでないことは明白である。少なくとも関連した複数の工程を同時にロバスト最適化する

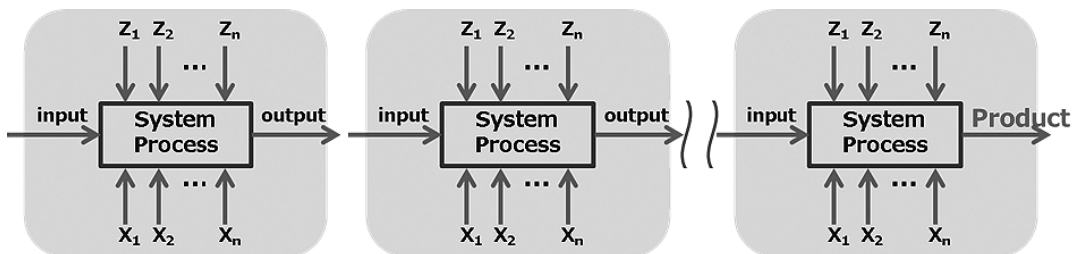


図1 一般的な製品の製造ライン

必要がある。即ち、特定の工程の担当技術者が工程内の誤差因子に対するロバスト設計を実施したとしても、他の工程内の誤差因子の影響を除去することができないため、最終的な製品の品質向上には効果を期待できない場合がある。

- b) このためには、複数の工程内におけるそれぞれの誤差因子を取り込んだ実験計画を実施する必要がある。従来の品質工学の手法では、誤差因子を直交計画の外側に割り付ける。二つの工程からそれぞれ一つの誤差因子を抽出した場合、それぞれが二水準であっても実験数は最低でも4倍となり、実験のコストが急激に大きくなる。
- c) 仮に、ロバストな解が見つからなかった場合、実験に費やしたりリソース（コスト、時間）が無駄になってしまう。更には、現状を少しでも改善するため、それに準ずる解を模索することが必要となる。そのためにはそれぞれの工程を担当する技術者間での協議が必須となる場合がある。この協議は利害関係者間の交渉の場と捉えるべきものであるが、その交渉のベースとなるデータの提示は従来手法では困難である。

このうち、特にc)の理由は、上述したコンソンの悲劇と深く関係する。本研究では、ロバスト設計に題材を取り、この問題を克服するための従来の品質工学のパラダイムを超えたアプローチについて考察する。このアプローチではそのベースを技術的交渉においたところに特徴がある。更には、本事例では上述のb)に対応すべく、技術者がロバスト設計に取り組みやすくなるように実験数の削減を考慮する。具体的には、誤差因子を外側に割り付けず、質的ではなく量的な設計因子として扱う。実験数を圧縮した最適計画のデータから統計モデルを作成し、設計段階でロバスト性を検討するという手順を採用する。こうすることで最適計画に基づいて大幅に実験数を圧縮でき、実験コストの低減が可能となる。

### 3.2 システムの定義（モデル工程の説明）

本研究では以下に述べる製造ラインをモデルとして考察をすすめる。モデルとするのはある

機械部品の製造ラインであり、製品の機械的強度が製品の特性として重要である。図2を用いて、製造工程のフローを説明する。最初に原料となる棒状鋼材から円柱状の部材が切り出される。切り出された円柱状の部材は切削工程で開穴された後、次のプレス加工工程で鍛造成形される。最後に部材は、機械強度をあげるために熱処理工程で焼き入れが施される。こうした一連の加工工程の後に、製品の寸法と強度とが一定の値（スペック）にあるかが検査工程でチェックされる。検査工程では製品の各部寸法が光学的計測装置により計測されるとともに、機械的な強度が一定以上であることが非破壊検査によってチェックされる。この工程でスペックを満たした製品は出荷に、スペックアウトのものは可能なものは追加加工に回され、そうでないものは廃棄されることになる。

本研究では、これら一連の工程のうち切削工程と熱処理工程とに注目する。切削工程では部材が所望の形状にラフに成形されるが、切削装置の加工ばらつき等の影響で加工形状等にばらつきが発生する。このため、加工後の光学的計測により部材各部の寸法がスペックに入っているかがチェックされる。切削工程の担当技術者は加工後の各部寸法のスペックを目標として装置の調整及びプロセスの最適化に注力している。一方、加熱処理工程では部材のひずみが生じ、部材の円筒度（真円度）等が低下する。仮に切削工程においてスペックがギリギリの部材がプレス加工工程を経て熱処理工程にきた場合、最終的な検査工程で製品がスペックアウトになってしまう可能性が高くなる。もちろん、このことを見越して切削工程でのスペックが定まっていればよいが、通常は工程のスペックはベストエフォートで定まっていることが多い。このため、切削工程に起因する部材のばらつきは熱処理工程の担当技術者にとって大きな誤差要因となっている。更には、熱処理工程内にも



図2 モデル製造ラインのフロー



加熱装置内の温度分布に起因する製品の機械的強度のばらつきが発生する。本研究では、熱処理工程から見て前者のばらつきを外部誤差、後者を内部誤差と呼ぶことにする。内部誤差は誤差といっても担当者の支配下にあり、担当者の努力だけでなんとかなる可能性があるが、外部誤差は別の担当者の支配下にあるため、自らの努力だけではどうにもならない。ここに当事者間の交渉の余地がある。

二つの工程のうち最初の切削工程では製品がラフ成形される。従って、この工程での出力は特定部位の寸法である。基本的に後続のプレス加工工程ではその寸法精度に依存した部材歪みが発生すると考えられている。この歪みを除去する目的で熱処理工程で加熱処理を含んだ処理が実施される。この工程を経て初めて製品の機械的強度が計測可能となる。熱処理工程における出力である機械的強度が製品の信頼性に大きな影響を与えることが判明しており、信頼性テスト結果に基づいて機械的強度のスペックは2.5以上3.7以下と決定され、厳密に管理されている。機械的強度が望大特性となっていないのは、この製品が別の部品と組み合わせて使用されるために一定以上の強度は隣接した部品の寿命の低下をきたすためである。

また、製品の市場での利用形態を考慮すると、できるだけ製品特性のばらつきは少ないことが望ましい。機械的強度のばらつきは加熱処理のばらつきに起因するのはもちろんであるが、それだけでなく、上述したように切削工程における加工寸法のばらつきが大きな影響を及ぼすことが判明している。従って、切削工程では部材の外形寸法がスペック範囲内に収まるようには管理されているものの、そのばらつきが熱処理工程に及ぼす影響までは想定されていない。このため、如何に頑張っても熱加工工程内の対応だけでは製品のロバスト化が困難となる可能性がある。この影響を評価して外形寸法のスペックを厳しくすることは工程全体として一つの改善策ではあるが、このことで必要以上に切削工程の歩留まりを落とすことは担当技術者としては納得できない。ステークホルダー間の合意形成がなされていない現状では、切削工程のスペック変更には大きな障害があり、その結

果として最終的な製品検査である機械的強度計測のスペックを外れる製品が多く、歩留まりの低下を招いていた。

### 3.3 設計因子と誤差因子

上述の状況を工程内外の誤差因子の観点から整理する。上述のように切削工程の出力である寸法は熱処理工程から見れば誤差因子と捉えることができる。このためこの因子を外部的誤差因子  $Z_{ex}$  と呼ぶ。一方熱処理工程では処理温度は様々な要因から制御が困難であるため、工程内の誤差因子として扱い、 $Z_{ex}$  に対して内的誤差因子  $Z_{in}$  と呼ぶ。この際、 $Z_{ex}$  には非線形効果があることが固有技術の知見としてわかっているため、実験では三水準の因子とし、非線形効果がないと想定される  $Z_{in}$  は二水準の因子とする。これに加え製造パラメータである二つの設計因子  $X_1$ ,  $X_2$  とで熱処理工程のシステムは構成される。これらの因子においても非線形効果が想定できるため、同様に三水準とする。上述のシステム構成を図3に示す。熱処理工程のロバスト最適化に際し、別の工程である切削工程の出力が誤差因子として扱われていることに注意されたい。

### 3.4 解決すべき問題（最適化の定義）

本事例では熱処理工程の担当技術者が以下の問題を解決するためのパラメータ設計を実施することを想定する。

1. 本事例では製品の機械的強度を特性  $Y$  とする。そのスペックは2.5以上3.7以下である。
2. 切削装置の加工精度のばらつき、及び熱処理のばらつきに対して、特性をロバストにする

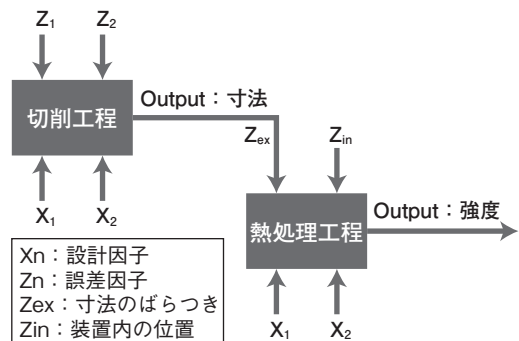


図3 熱処理工程のシステム構成

るように熱処理工程の製造条件を決定したい。言い換えると、Zex及びZinの水準範囲内でYをロバストにする熱処理工程の製造条件である装置パラメータであるX1, X2を求めたい。

3. Zex, Zinに対するロバスト解が見つからない場合は、それに準ずる解を求めたい。
4. 基本的に自工程（熱処理工程）内で解を見出し出したいが、それが不可能であれば他工程である切削工程へ協力を要請する。
5. 実験コストの制約により実験数は20以下としたい。

次節では、上述の問題を解決するための実験計画を作成する。

#### 4. 実験計画の作成

##### 4.1 計画作成のシナリオ

一般的にパラメータ最適化設計に及んで技術者のアプローチは次の二つに分かれる。一つは、あまり現行条件を変えずに少しでも良い特性を見つけようという漸次的アプローチであり、もう一つは最小限のリソースで真の最適解を目指すという抜本的アプローチである。前者であれば、計画の作成にそれほど気を使う必要はなく、あれこれ考えるよりもむしろ今すぐ実験に取り掛かることが賢明である。一方、後者のアプローチではシステムの背後に潜むメカニズムを探り、それをもとに所望の設計解を導出することになる。このためには、データから良い統計モデルを作成する必要がある、そのための計画を綿密に立てることが必須となる。以下

ではこのような立場の違いを二つのシナリオに沿って記述する。

##### 4.2 シナリオ1（品質工学による漸次的アプローチ）

このアプローチでは品質工学の適用を想定する。本事例では経験的に得られている知見のもとにZexは三水準にとっている。従って、誤差因子は三水準のZexと二水準のZinを外側に割り付けることになる。作成した計画を表1に示す。この表で、例えばZex[-1]Zin[-1]はそれぞれZexとZinとがともに第一水準である場合を示し、空白欄を意味する•に実験データが入力される。

当然ながら実験数は非常に多くなるため、何らかの手段で実験数を圧縮する必要がある。品質工学で実施される誤差の調査は手段の一つではあるが、今回の場合、誤差因子間に交互作用があることが濃厚であるために誤差因子の調査はリスクが大きい。

実験数が多くなることに加え、更に、この手法ではロバスト設計は可能であっても、仮にロバストな解がない場合にはその先に進むことが困難という問題がある。例えば、Zexがこの範囲までであればロバストな解がある、というような解析は誤差因子を量的にあつかうことではじめて可能となる。もちろん、製品の寸法のばらつきがどの程度であればロバスト化が可能であるかという解析を試みることは可能ではあるが、寸法と特性との線形性が不明である状況では、あくまでも参考程度に留めるべきである。

表1 シナリオ1による実験計画

Exp#	X1	X2	Zex[-1]Zin[-1]	Zex[0]Zin[-1]	Zex[1]Zin[-1]	Zex[-1]Zin[1]	Zex[0]Zin[1]	Zex[1]Zin[1]
1	-1	-1	•	•	•	•	•	•
2	-1	0	•	•	•	•	•	•
3	-1	1	•	•	•	•	•	•
4	0	-1	•	•	•	•	•	•
5	0	0	•	•	•	•	•	•
6	0	1	•	•	•	•	•	•
7	1	-1	•	•	•	•	•	•
8	1	0	•	•	•	•	•	•
9	1	1	•	•	•	•	•	•

Inner alley: L9

Outer alley: two noise factors (two levels and three levels each)

Number of experiments:  $9 \times 6 = 54$

上述したように、いろいろな問題はあるが、このアプローチは量産工場での実験ということでは一番無難といえる。得られる情報は少ないとはいえ、確実に良い方向にプロセスをチューニングはできる。いずれにせよ、実験数を20以下に削減するのは困難であるため、この状況では品質工学によるシナリオを実行することは断念せざるを得ない。

#### 4.3 シナリオ2（統計モデリングによる抜本的アプローチ）

このアプローチでは統計モデリングによる最適設計を想定する。X1 \* X2の交互作用、X1<sup>2</sup>、X2<sup>2</sup>の二次項を考慮した最適計画は最小実験数7であり、これを内側計画として外側にZexを三水準、Zinを二水準の誤差因子として割り付けると実験数は42となる。実験数の上限を大幅に超えるにもかかわらず、ZexとZinとに対するロバスト設計ができるのみで、誤差因子を量的に扱う、例えば、切削工程を経た製品の寸法がどのような値であれば所望の特性が得られるか等の議論が困難である。この状況は誤差因子を質的に扱う限り、シナリオ1と全く同じである。

そこで、ZinとZexとを量的に扱うために、誤差因子として外側配置するのではなく、設計因子として内側に配置して新たに計画を組むことを考える。この実験データから得られた統計モデルを用いてパラメータ設計をする際に、改めてZinとZexとを誤差因子として扱うことでロバスト設計が可能となる。高橋はこのようにして得られたモデルを統合モデルと呼んでいる。<sup>[17]</sup> こうすることで、4因子の最適計画として効率よく実験数を圧縮できる。但し、その目的に合致した最適計画の作成にあたっては、

表2 シナリオ2における交互作用テーブル

	X1	X2	Z <sub>in</sub>	Z <sub>ex</sub>
X1	✓✓		✓✓	✓
X2		✓✓	✓✓	✓
Z <sub>in</sub>				✓
Z <sub>ex</sub>				✓

✓：積項のみ  
 ✓✓：積項に加えてその積項とZexとの交互作用

固有技術の知見を取り入れて効率よく実験数を圧縮することが肝要である。今回の実験では既存の固有技術の知見をもとに表2に示した交互作用及び二次項を考慮した。表中、✓はその欄に対応した積項に加えて、その積項とZexとの交互作用をも仮定していることを意味している。従って、このテーブルでは主効果4 + 二次項3 + 二次交互作用5 + Zexと二次積項との交互作用4で合計16の項が仮定されている。この場合の最小実験数は18になる。

この計画では、Zexとその他の項の交互作用は考慮されているが、Zex<sup>2</sup>とその他の項の交互作用は省かれている。Zex<sup>2</sup>そのものは考慮されているので、Zexの二次の効果はロバスト設計に反映されるが、その二次の効果はX1、X2、Zinが変化してもその影響を受けないというモデルを仮定している。仮に、X1、X2、Zinによって誤差因子の二次の効果が変わるというモデルであれば、以下の三つの項も取り入れたほうが安全である。

X1 \* Zex \* Zex  
 X2 \* Zex \* Zex  
 X3 \* Zex \* Zex

しかしながら、これらの項をすべて考慮する最適計画を作成する場合、最小実験数は21になってしまう。実験数が増えるのは、より多くの情報を得るための代償として考えるべきであろう。また、Zinに関しては二次項、及びX1<sup>2</sup>とX2<sup>2</sup>との交互作用を考慮していない。実験数の制約から、パラメータ設計の精度にリスクは残るが、より重要なZexに重きを置いてこれらの交互作用項は計画から除外した。もちろん、仮にこの交互作用の影響が実際は大きいのであれば後続の拡張計画で補うことも可能である。

このアプローチでは誤差因子を量的に扱うことに特徴があり、以下のようなメリットがある。

1. 熱処理工程の出力特性がZexに対して非線形である場合、シナリオ1よりも予測精度は向上する。
2. 例えば、切削工程後にZexの値を計測し、その値を用いた熱処理工程のFeed forward最適化等、このモデルを用いたシステム制御

表3 シナリオ2による実験計画

Exp#	X1	X2	Z <sub>ex</sub>	Z <sub>in</sub>
1	0	-1	1	-1
2	0	-1	-1	1
3	-1	0	-1	1
4	1	1	1	1
5	0	-1	1	-1
6	1	-1	-1	-1
7	-1	1	-1	-1
8	-1	1	1	1
9	0	1	-1	1
10	-1	0	1	-1
11	-1	-1	1	1
12	1	1	-1	-1
13	0	0	-1	-1
14	0	0	1	1
15	1	0	1	-1
16	1	0	-1	1
17	-1	1	0	1
18	1	-1	0	1

Inner alley: Optimal design 20experiments  
(minimum 18)

Outer alley: None

Number of experiments: 20

が可能となる。

3. 本事例のように、前の工程の出力が後の工程と共同して特性に重要な影響を及ぼす場合、両工程間のリスクマネジメント交渉のベースとなる設計が可能となる。この交渉の過程については7章で議論する。

最適計画による最小実験数は18となったが、モデルによる予測分散をより小さくする効果と何らかの原因による実験の失敗の予備として実験コストの最大である20実験を実施した。20実験の計画を表3に示す。このように最適計画では必要最数以上であれば任意の実験数で計画を作成できることに特徴がある。必要以上に実験数を多くする意味はないが、今回の程度であれば実際に計画の予測分散値を低減できることを確認している。

#### 4.4 実験

ロバスト設計の実験における最大の問題は、製造工程では制御不能である誤差因子であるZexとZinの値を実験の場では固定しなければならないことである。如何にしてその値を固定して実験を可能とするかに技術者の力量が関わ

れているといっても良い。モデルケースである本事例では、Zexについては切削工程を経た製品をプールしてその計測値が水準値と等しいものを選別することを想定する。時間さえかければ確実に実験用のサンプルがストックできる。Zinについては温度のばらつきは加熱装置内の位置によりもたらされることが判明しており、特定の場所の実験用サンプルを入れて処理することでZinの値を固定するものとする。特性Yである製品の機械的強度はすべての実験が完了した後にまとめて計測される。

#### 5. モデリング

実験で得られたデータの振る舞いを数式に当てはめることで得られる統計モデルは、後続するパラメータ設計に必須である。本研究では誤差因子を特別扱いせずに、設計因子と並列に扱う統合モデルを採用することを想定して実験計画を作製した。実際のデータの統計処置には統計計算ソフトであるJMP<sup>®</sup> 11 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) を使用し、BIC基準を採用しステップワイズ法により変数選択してモデルを作製した。この結果を図4に示す。候補として抽出されたモデルの寄与率は99%と高く、仮定した交互作用及び積項は妥当であった可能性が高い。モデルの詳細を見ていくと、まずX2とZexの影響が特性Yに支配的であることがわかる。X1の影響はZinと同程度である。交互作用ではX2 \* Zex、及び誤差因子間の交互作用Zex \* Zinが若干効いている。

もちろん、このモデルはデータの数値的なフィッティングの結果としての候補の一つであって、必ずしも真実とは限らない。しかしながら、これらの結果は固有技術の知見と矛盾しないことが確認できたため、モデルの信頼性としてはこれを用いたパラメータ設計に耐え得るものが得られたと判断した。このモデルによるデータの予測値と実測値との相関を図5に示す。点が実測値で線が予測値を示している。



Sorted Parameter Estimates					
Term	Estimate	Std Error	t Ratio		Prob> t
X2	-0.785789	0.090835	-8.65		0.0010*
Zex	1.0954934	0.183926	5.96		0.0040*
Zin	-0.314653	0.076215	-4.13		0.0145*
X1	-0.363947	0.090835	-4.01		0.0160*
Zin*Zex	0.2462829	0.086173	2.86		0.0460*
X2*Zex	0.2596053	0.099504	2.61		0.0595
X2*X2*Zex	-0.414013	0.172347	-2.40		0.0742
X2*Zin*Zex	-0.216053	0.099504	-2.17		0.0957
X1*Zin*Zex	-0.174868	0.099504	-1.76		0.1537
X1*Zex	-0.155	0.099504	-1.56		0.1943
X1*X1*Zex	0.2630921	0.172347	1.53		0.2016
X1*Zin	0.1023684	0.090835	1.13		0.3228
X2*X2	0.1226579	0.16249	0.75		0.4923
X1*X1	0.0166053	0.16249	0.10		0.9235
X2*Zin	0.0010526	0.090835	0.01		0.9913

図4 統計モデルの分散分析表

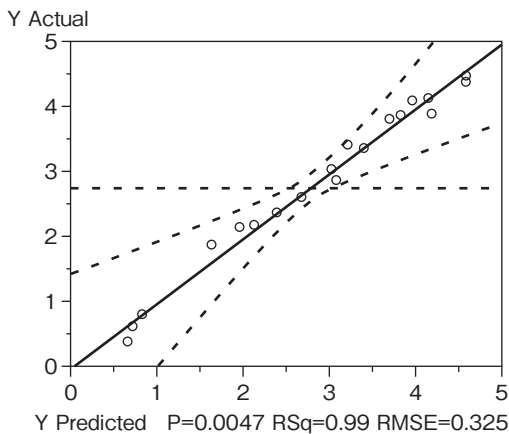


図5 実測値と予測値との相関

## 6. 最適化設計

本章では得られたモデルを用いてロバストパラメータ設計を試みる。

### 6.1 Zexに対するロバスト設計

まずは自工程である熱処理工程内で所望の解が得られるかを検討する。このためには、得られたモデルに対しZexを誤差因子として以下の制約条件でロバスト最適化を試みればよい。

1. Zexの変動に対するYの変化を0に制約
2. 如何なるZexに対してもYの最大値は3.7以下
3. 如何なるZexに対してもYの最小値は2.5以上

この制約条件では仮にロバスト解が得られない場合でも特性Yのばらつきがスペックに収まればよいという柔軟な設計となっている。しかしながら、この制約条件を満たす解は存在しない。最もロバストな解では、Yの上限の推定値を0.5%程度超えてしまう。0.5%とはいえ、信頼性のデータから厳密に規定されているスペックを超えることは許されない。一方で、この解ではすべてのZexの値に対してYのばらつき範囲は0になる。この場合の設計値は図6に示すとおりである。従って、Zinを-1に固定できさえすればZexのばらつきを吸収できることになるが、現実にはZinは加熱装置内の温度分布であるため、その対策は非常に困難である。工程中でのばらつきをいかにしても抑えるには、例え

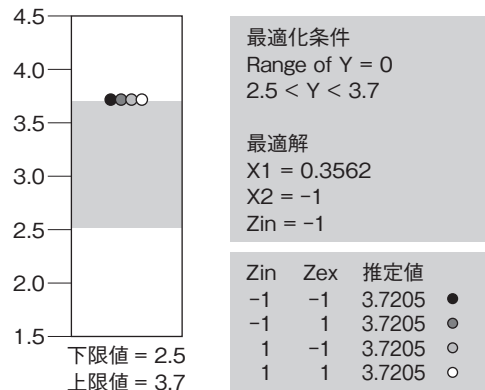


図6 Zexに対するロバスト設計

ば、加熱装置内にたった一つの製品を入れることで温度分布の影響を除外することが可能となる。しかしながら、スループットの観点から現実的ではない。

## 6.2 Zin, Zexに対するロバスト設計

次に、以下の制約条件でロバスト最適化を試みた。

1. Zin, Zexの変動に対するYの変化を0に制約
2. 如何なるZin, Zexに対してもYの最大値は3.7以下
3. 如何なるZin, Zexに対してもYの最小値は2.5以上

図7に示すように、この制約を満たす解も残念ながら存在しない。最もYのばらつきを小さくできるのは $X1 = 0.63$ ,  $X2 = -1$ のときであって、YのばらつきはRangeで1.56162と推定される。Zin, Zexの水準端の値におけるYの予測値を図7の右下部に示す。ZinとZexとが現在の水準範囲を変動する限り所望のスペックである2.5以上3.7以下にすることはできないことがわかる。

## 6.3 次善のプラン

ロバストな解が得られなかったため、次善のプランを検討する。現時点で取り得るプランとしては

1. 特性のスペックを緩和する
2. 外挿設計を試みる

の二つが考えられる。前者ではロバスト解がな

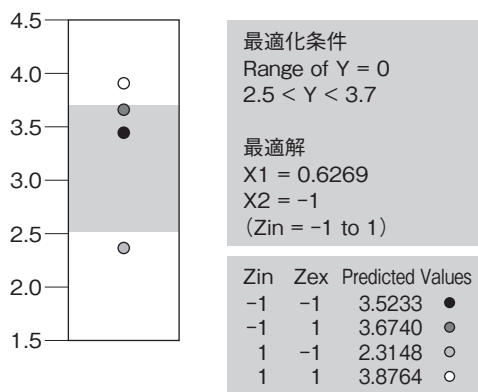


図7 Zin, Zexに対するロバスト設計

いのであるから、そもそも特性の仕様がオーバースペックであったのではないかという考えである。生産の実力を考慮せず、あるいは実力を測る術がない場合には、製品理想を追求するスペックありきの机上の空論が横行しやすい。この場合は、得られた解が最善の解として採用される。製品特性のスペックに根拠が希薄な場合は検討すべきプランではあるが、今回の事例では製品の信頼性に基づいてスペックが定められているため製造上の問題回避としてスペックを変更することは好ましくない。

後者の外挿設計は6.1で得られた最もロバストな解は $X2$ が水準範囲の端にきていることに基づく。この状況では、この範囲の外に更に良い解があると推定することは自然であろう。但し、統計学ではこの推定を否定している。特定の領域内で作製したモデルはその領域内でのみ有効であり、そのモデルの他の領域で用いることは統計学的には根拠が無い。しかしながら、解がありませんでしたと引き下がることのできない状況がある。例えば、実験に際し膨大な費用や時間といったリソースを費やした場合や、今日中にも対策を施さなければ生産ラインに大きな損害がでるような場合では、藁にでもすがりたい。可能性があれば、そこを探らないという手は無い。特に、今回の実験のように、得られているモデルに二次項が想定され、そのための実験計画が組まれていれば、外挿にあたってのリスクは小さくなる方向にある。そこで、 $X1$ の上限と $X2$ の下限とをそれぞれ倍に拡張した水準範囲内における外挿設計を試みる。ここには結果は示めさないが、残念ながら、特性のばらつきは更に小さくはなったが、まだ0にはできないという結果であった。また、特性のスペックも上限を超えてしまう。外挿設計では、再現実験の結果を踏まえてその妥当性を吟味することが不可欠であるが、本事例の場合現状のシステム構造では解がないと判断し準解を導出することに決定した。

## 7. 交渉による準解の獲得

本研究で得られた統合モデルでは因子に特定の役割を持たせることなく、自由な設計が可能である。<sup>[17][9]</sup> ここでは完全にばらつきを0に

することは断念し、可能な限りYのばらつきを小さくした上で、特性のスペックを満たすZin, Zexの許容ばらつきを求めることを目的とする。基本的にZin及びZexのそれぞれに対して現状のばらつきを低減することで、その縮小範囲内でYのスペックを満たすことを実現する。熱処理工程の担当者がZinのばらつき低減のみでこの設計を実現できない場合は、Zexのばらつき低減が必須である。とはいえ、Zexのばらつきはスペック内に収まっているために切削工程の担当者としては余計な仕事であると捉えられかねない。このように、ZinとZexという二つの工程に跨った因子を扱う場合には、ステークホルダー間の交渉が必要になってくる。

ステークホルダーは切削工程の担当者と熱処理工程の担当者である。最初にどの程度のばらつきの低減が必要であるかを視覚化するために、統合モデルを三次元グラフ化する。図8は最もロバストである解にX1とX2とを固定した場合に、ZexとZinとのばらつき範囲に対して特性がどのように変化するかを示した応答曲面である。Zinが大きいところではZexの変化が大きくなっている一方で、Zinが小さければZexのばらつきはほとんどYに影響しないことがわかる。このように応答曲面がねじれているのは交互作用の存在を意味している。Yの上限である3.7のところにグリッドを表示してある。このグリッドからはみ出した部分で特性がスペックを外れていることがわかる。

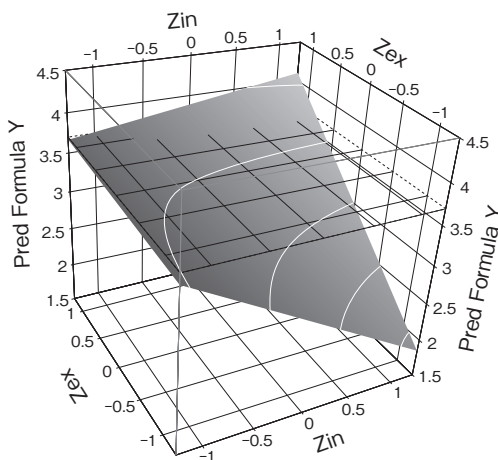


図8 応答関数の三次元可視化

三次元グラフは多くの情報を一度に把握できるところが長所ではあるが、その情報の読み込みに習熟が必要である。また、人によっては空間的な形状の把握に得手不得手があり、実際の交渉に当たっては、状況に応じて同じ応答関数を等高線図で示したほうがよい。図9に交渉に用いる等高線図を示す。この図の網掛けの領域が特性がスペックを満たさないNG領域である。図の上部だけでなく右下にもNG領域が存在することに注目されたい。これらのNG領域を回避するためには次の三つのアプローチがある。

- Zinのばらつきを-1から-0.75の範囲に低減する。この場合、Zexは現状のばらつきを保持できる。しかしながら、Zinのばらつきをこの範囲に抑えることは技術的に不可能である。
- 切削工程の担当者にZexのばらつきを-0.75から0.77の範囲に低減するように申し入れる。この場合はZinのばらつきは現状のままでもよいことになる。しかしながら切削工程の担当者がこれを実現するには加工精度を向上させるために多大な苦勞を強いられることになる。
- 上述のような一方的な申し入れの交渉では製品の不良低減という同じ目的は共有していても、互いに責任の押し付け合いになりかねない。そこで、熱処理工程ではZinのばらつきを-1から0.7に縮小する。このことは、スループットが遅くなるというデメリットはともなうものの、加熱装置の特定の場所を処理に使わないことで実現可能である。この上で、切削工程の担当者にZexのばらつきを-1から0.77に低減するように要求するのである。同時に上のNG領域を回避するためにはZexのばらつき上限を下げることで効果が大きいことを図9をもとに説明することも重要である。

このように統合モデルから導いた可視化情報をベースに技術的交渉を行い、両工程の担当者間での妥協点を見つけることになる。本事例では準解として上述のケースc)を採用する。工程の制約は大きくなったが、所望の特性を満たすことができる解の中では最も現実的である。

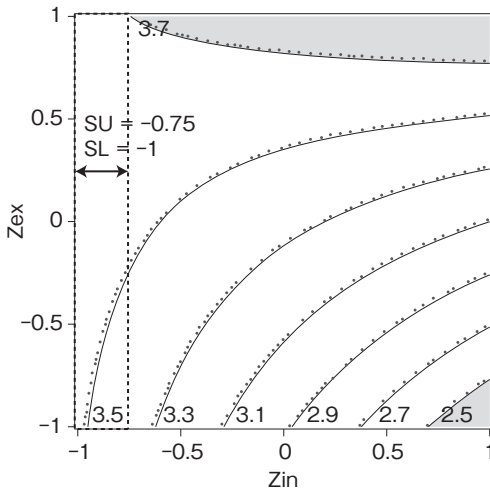


図9 a ケース (a) の等高線図

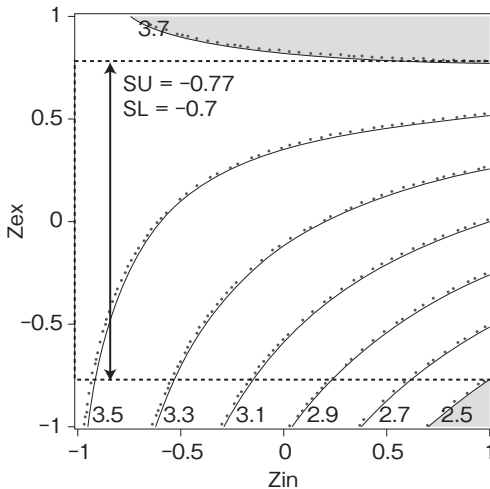


図9 b ケース (b) の等高線図

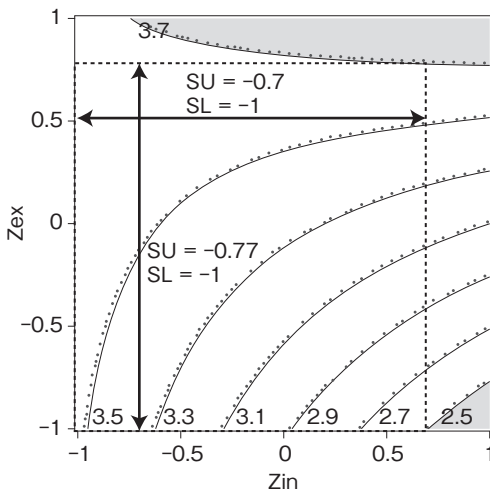


図9 c ケース (c) の等高線図

更には、この解を見いだす過程が技術者にとってモラルの向上に繋がると考える。

## 8. 結論

誤差因子に対する特製のロバスト化を目的とするロバスト設計には、品質工学が適用されてきた。本研究では従来の品質工学のパラダイムを超えたロバスト設計のアプローチについて提案した。その価値は次の二つにあると考える。第一に、従来のロバスト設計を目的とした実験は必要とされる費用や時間が大きい。このため、技術者の負荷を小さくする目的で、誤差因子と設計因子とを同等に扱う統合モデルを想定した実験計画を最適計画に従って作製した。こうすることで、最小の実験リソースでロバスト設計に必要な統計モデルを得ることができる。第二に、統合モデルを用いた本手法では誤差因子を従来の品質工学と異なり量的に扱うことが可能である。このため、そこから得られた情報は、仮に所望の解が存在しなかった場合であっても、技術的交渉に活用できるという効果がある。本研究では特に後者の効果に注目して議論した。交渉とは討論によるコミュニケーションにより合意を得る過程のことを意味し、通常ではレトリックの技法が重要な手段として用いられる。しかしながら、この観点から交渉を捉えると、単に相手に勝つための技術と理解されると止まってしまう。この技術の行き着く先は、本研究の冒頭で述べた「コモンスの悲劇」である。交渉の本質は相手を打ち負かすことにあるのではなく、互いに共存できる調和の場を見いだすことにある。この方向にのみ「コモンスの悲劇」を回避する道があると考え、本研究ではその具体的なアプローチとして統計モデルを用いた技術的な交渉について提唱した。

## 【参考文献】

1. Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yuin Wu (2004): *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, Wiley-Interscience.
2. Hardin, Garrett (1968), 「The Tragedy of the Commons」, *Science* 13 December 1968: Vol.162 no.3859 pp.1243-1248.
3. ヘンリー・ペトロスキー (2014): 「エンジニア



- リングの神髄], pp.191, 筑摩書房.
4. 一色正彦, 田村次朗, 隅田浩司 (2010): 「交渉学入門」, 日本経済新聞出版社.
  5. 一色正彦, 田上正範, 佐藤裕一 (2013): 「理系のための交渉学入門: 交渉の設計と実践の理論」, 東京大学出版会.
  6. Joseph, V.R. and Wu, C.F.J. (2002): "Robust Parameter Design of Multiple-Target System", *Technometrics*, 44, [4], 338-346.
  7. Joseph, V.R. (2003): "Robust Parameter Design With Feed-Forward", *Technometrics*, 45, [4], 284-292.
  8. 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.
  9. Mitsui, T, Takahashi, T., (2014), "A new approach of robust parameter design for a product fabrication organized by plural processes", Proc. of International Conference on Quality '14 Tokyo, proceeding (in printing).
  10. 宮川雅巳 (2000): 「品質を獲得する技術—タグチメソッドがもたらしたもの」, 日科技連出版社.
  11. 宮川雅巳 (2006): 「実験計画法特論」, 日科技連出版社.
  12. Phadke, M.S. (1989): *Quality Engineering using Robust Design*, Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey.
  13. Roger Fisher, William L. Ury and Bruce Patton (1981): *Getting to Yes: Negotiating Agreement Without Giving In*, Houghton Mifflin.
  14. Shomeker, A.C., Tsui, K.L., and Wu, C.F.J. (1991) "Economical experimentation method for robust design", *Technometrics*, 33, [4], 415-427.
  15. 田口玄一 (1976, 1977): 「第3版実験計画法 (上) (下)」, 丸善
  16. Takahashi, T., (2003), "Regression Analysis by Crossed Array Experiment" Proc. of the 32nd International Conference on Computer and Industrial Engineering, pp.259-264.
  17. Takahashi, T., (2014), "Design for Multi-Input and Multi-Process Based on Hyper Optimization Method HOPE", Proc. of International Conference on Quality '14 Tokyo, proceeding (in printing).
  18. 高橋武則 (2007): 「超回帰最適化」, JSQC第83回研究発表会発表要旨集, pp.127-130.
  19. 高橋武則 (2011): 「調和設計」, JSQC第95回研究発表会発表要旨集, pp.237-240.
  20. 高橋武則 (2012): 「調和設計の構造」, JSQC第100回研究発表会発表要旨集, pp.241-244.
  21. 高橋武則, 鈴木圭介 (2013): 「調和設計の企画化と模型と最適化」, 目白大学経営学研究第11号.
  22. 高橋武則 (2014): 「超最適化による調和設計」, 目白大学経営学研究第12号.

