

調和設計の企画化と模型化と最適化

Planning, Modeling and Optimization of Harmonious Design

高橋 武則 鈴木 圭介

(Takenori TAKAHASHI Keisuke SUZUKI)

【要 約】

関係者（ステークホルダー）が少なければ製品やサービスの設計は容易であるが、関係者が多いと複雑なトレード・オフの問題が生じるために設計は極めて困難なものとなる。そこで、本研究はこのような場合に有効な調和設計という設計アプローチを提案する。これは数理計画法を用いて全体として調和のとれた条件（設計因子の水準）を決定するという設計方法である。このアプローチは企画化と模型化と最適化の3つのステージから構成されている。そして最適化のステージではPDCAサイクルに基づいた逐次最適化を採用している。本稿では、高橋によって開発された複葉型紙ヘリコプターを用いてアプローチの具体的な内容を解説している。

キーワード：設計，模型化，最適化，PDCAサイクル，頑健設計，合意形成，超構造

【Abstract】

It is easy to design products and services if there are few stakeholders, but it is not easy to design them if there are many stakeholders, because they have the issue of very complicated trade-off. This paper proposes harmonious design which is effective in such situation. It is the design approach that can decide conditions harmonized with by a mathematical programming. This approach consists of three stages that are planning stage, modeling stage and optimization stage. Sequential optimization approach based on PDCA-cycle is adopted on the optimization stage. In this paper the concrete description of proposed approach is introduced by using the example of the twin-rotor paper-helicopter developed by TAKAHASHI.

Keyword : designing, modeling, optimization, PDCA-cycle, robust parameter design, consensus-building, hyper-structure

1. はじめに

商品（商う対象）には製品（ハードな有形の存在）とサービス（ソフトな無形の存在）があり、両者はいずれも設計に基づいて作られ／提供される。設計（design：設計 [名詞]，設計する [動詞]）には行為の場合と結果の場合があり、行為の場合は作るべきもの／提供すべきものの条件を決定することであり、結果の場合は設計によって決められた作るべきもの／提供すべきものの条件のことである。

行為としての設計を議論するために主体、客体、指標、設計因子、水準を以下に定義する。

- *主体：設計を行う者のことである。決定する人や組織などがある。
- *客体：設計で配慮がされる対象のことである。材料、条件、使用者、組織などがある。
- *指標：ものごとの見当をつけるためのもので、この状態に基づいて設計が行われる。指標は設計因子（後述）の関数であり、特性と項目から構成される。特性とは対象のもつ特有の性質で、その存在意義そのものに関わるものである。項目とは対象に関する付帯的なものではあるが設計の際に無視できないもので以下の6つに分類される。
 - Q（Quality：品質）
 - C（Cost：コスト）
 - D（Delivery：デリバリー）
 - R（Robustness：頑健性）
 - S（Safety：安全）
 - E（Environment：環境）
- *設計因子：設計対象の仕様（満たさなければならぬ事項に関してどうあるべきかを示した客観的な内容や状態）を記述する変数のことであり、何に関してその水準（後述）を決定するのかを意味する。設計因子には製品の場合と工程の場合がある。製品の場合は製品の諸元を構成する変数のことであり、工程の場合は製造の条件を構成する変数のことである。
- *水準：設計因子の具体的な値や状態である。

ある特定の客体に対して一人の主体が少数の指標に基づいて設計することを特化設計という。特化設計では質が満足度であることを前提

として設計が行われる。しかし、主体と客体と指標が増えた場合には、これらの間に複雑なトレード・オフ関係が生じるために、多数の関係者（stakeholder：ステークホルダー）全員の満足度を矛盾なく高めることは不可能であり、特化設計のアプローチでは求解（＝設計）が困難となる。

しかし近年、設計においては指標を多数取り上げ、関係者も多くなる場合が少なくない。そこで、関係者が条件（設計）について満足することはできなくても納得することを目指す設計方法が必要になる。つまり、質を関係者の納得の度合と考え、行為としての設計を関係者の合意形成、行為の結果としての設計を合意された内容と考える方法である。この方法は、何らかのアプローチで示された条件（設計水準）に対して関係者全員が話し合いを通した納得に基づいて合意することに他ならない。調和設計とは、多数の関係者が話し合いに基づいて合意を形成するという手続で仕様を決定することである。これを科学的かつ民主的に行うためには数理的手段である統計的モデル化と数理計画法を用いた最適化が不可欠である。^{[26],[29]}

本研究は調和設計の理論的な整理を行い、そのもとで以下の3つのステージで構成される具体的なアプローチ方法を提案する。

- ①企画化（計画）：枠組みを構成すること。
- ②モデル化（解析）：数式を作成すること。
- ③最適化（設計）：諸元の水準を決めること。

本論文の構成は次の通りである。第2章では複葉型紙ヘリコプターの実例を用いて設計における超構造について説明する。第3章ではQM（Quality Management：質管理）におけるパラダイム・シフトを示したうえで質設計の課題を整理する。第4章では提案する調和設計の構造と特徴について述べ、第5章では企画化、第6章ではモデル化、第7章では最適化について各々の具体的なアプローチを議論する。そして第8章ではまとめと今後の課題について述べる。

なお、本研究では製品の設計に焦点を合わせて議論し、サービスの設計の議論については別の機会に譲りたい。また、本稿では質とクオリティを同義で用いる。

2. 複葉型紙ヘリコプターと超構造

高度な設計においては、入出力回帰モデルと超回帰モデルの超構造が必要となる。^{[17],[20],[22],[25]} 以後の章でこれを分かり易く説明するために、本章では高橋によって開発された回転翼が複数ある複葉型紙ヘリコプターの実例を用いて超構造を説明する。^{[18],[19],[20],[21],[22]}

2.1 複葉型紙ヘリコプターと入出力回帰

複葉型紙ヘリコプターの作り方を図1に、立体図を図2に、そして展開図を図3に示す。

結果である出力（特性：時間）を y とし、原因である入力（解放高度、おもりの重さなど）を m としたときの関数関係を入出力回帰という。入出力回帰は製品を顧客が使うための回帰である。入出力には以下の3種類のモデルが存在する。

- * 1次モデル：1次項のみのモデル
- * 2次モデル：1次項と2次項のモデル
- * 高次モデル：3次以上の項を含むモデル

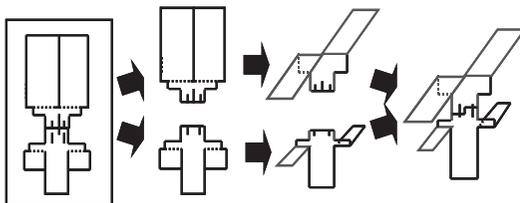


図1 複葉型紙ヘリの製作過程と完成図

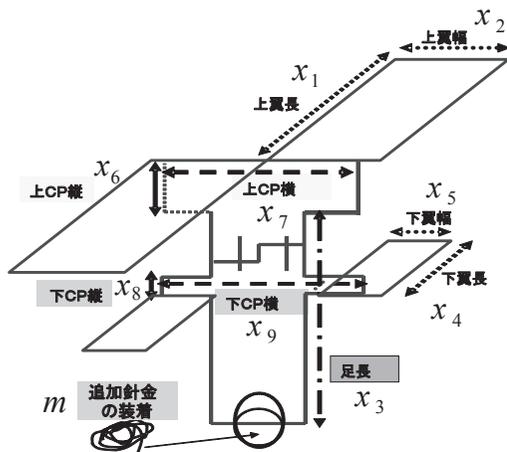


図2 複葉型紙ヘリコプターの設計因子

【注】1次で切片なしの場合は比例式モデル（あるいはゼロ点比例式モデル）と呼ぶ。^{[8],[13],[33]}

複葉型紙ヘリコプターでは、 y が時間（滞空時間）であり、 m が高度（複葉型紙ヘリコプターを空中に解放する高さ）になり、入出力回帰は図4に示すようになる。設計を視野に入れると図4に示す顧客要求域（Customer Request Zone, CRZと略記）が重要になる。縦軸は出力で顧客の要求の下限 R_L と上限 R_U 、横軸は入力で入力の下端 m_L と上端 m_U に囲まれた矩形が顧客要求域となる。製品の入出力回帰はこの矩形を満たさなければならない。

2.2 超構造と超回帰

超構造とは、「ある構造の中に更に構造（多くは同種）を内包した状態」のことである。nesting（入れ子）やfractale（自己相似）、recursion（再帰）がそれにあたり、易しい例としてはマトリョーシカ人形（人形の中に人形）

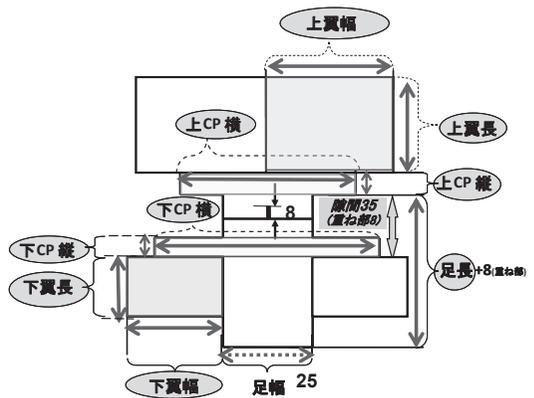


図3 複葉型紙ヘリの展開図と設計因子

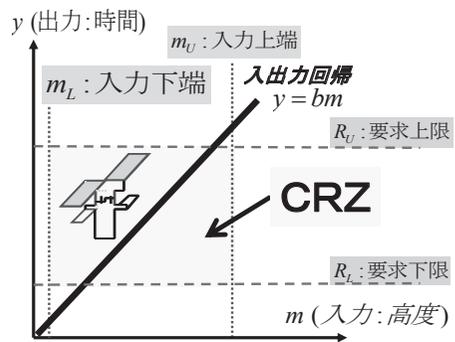


図4 顧客要求域（Customer Request Zone）

や箱根細工（箱の中に箱）がある。本稿の超構造には超回帰と超設計があり、この概念はモノづくりの設計においてきわめて重要である。

超回帰においては2つの回帰が存在する。一つ目は、客が製品を使用する際に用いる回帰で紙ヘリコプターの場合は以下に示す入力 m と出力 y の入出力回帰式である。

$$y = f(m) = bm \tag{1}$$

一方、製品の設計者は入出力回帰の係数 b を設計因子 x_1, \dots, x_p を用いて設計する。その際に使用する設計回帰が二つ目の回帰でその一般式（2次モデル）は以下のものである。^[31]

$$b = g(x_1, \dots, x_p) = c_0 + \sum_{i=1}^p c_i x_i + \sum_{i=1}^p \sum_{i < j} c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^p c_{ii} x_i^2 \tag{2}$$

この設計回帰は入出力回帰に対して超回帰と呼ばれる。超回帰は回帰の中に回帰が存在するという超構造を成している。入出力回帰はユーザーが製品を使用するための回帰（図4）であるのに対して、超回帰は設計者が製品を設計するための回帰である。図5に複葉型紙ヘリコプターの入出力回帰と超回帰とCRZの関係を示す。超回帰には以下の3種類のモデルが存在す

る。

- * 1次モデル：1次項（主効果）のみのモデル
- * 積モデル：積項（交互作用）もあるモデル
- * 2次モデル：1次項と積項と2次項のモデル

なお、項目は設計因子の関数ではあるが、これは出力（特性）とは別のものであるために超回帰とはなりえないものである。超回帰と区別するために、設計因子の関数として項目を論じる場合には項目関数と呼ぶ。

2. 3 超構造と超設計

高度な設計においては設計自体が超構造を構成する超設計がある。例えば、大きな企業が複数の工場を持っているとする。例として2つの工場A、Bの場合を取り上げる。同じ企業で同じ製品を作っている場合に、工場のロケーションが異なると環境を初めとして様々な前提条件が異なる。したがって、工場別に製品の仕様や製造条件を決めることが多いが、できれば同じ仕様や製造条件にしたい。その場合、A工場とB工場の異なる前提条件を踏まえたうえで、両者でできあがる製品に違いのない同じ製造条件を本社が設計する必要がある。このとき各工場を単位とした個別レベルの設計に、本社という一つ上のレベルの設計を加えて構造化した設計が必要となる。この場合、本社の設計の中に

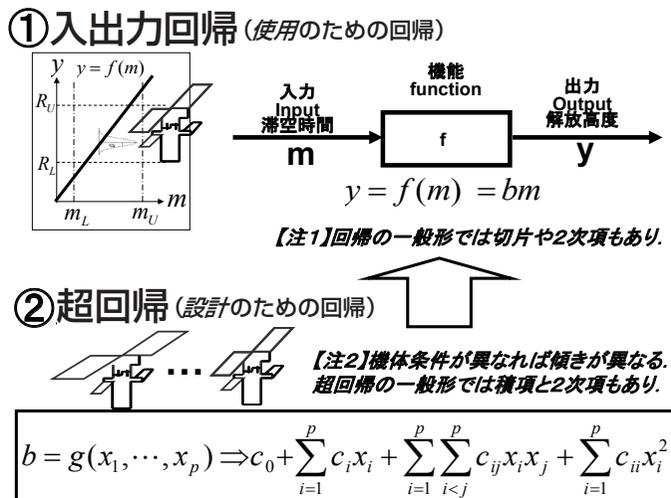


図5 入出力回帰（使用回帰）と超回帰（設計回帰）

各工場の設計が存在しているという超構造を成しており、これを超設計と呼ぶ。この設計は個々の工場別の定式化（制約条件と目的関数）を結合（一緒にすること）したうえで、さらに本社のレベルの定式化（制約条件と目的関数）を加えることで実現できる。

3. QMにおけるパラダイム・シフト

QMにおいては、質の時制、適合、対象、要因構造の4つの側面でパラダイム・シフト（paradigm shift：規範変更）が生じている。設計は、これらのパラダイム・シフトから生じる課題に対応する必要がある。本章では、4つの側面のパラダイム・シフトについて概説し、質設計における課題を整理する。

3. 1 質の時制のパラダイム・シフト：過去 → 未来

図6に示すように質には以下の3つの時制がある。

過去の質、現在の質、未来の質

QA（Quality Assurance：品質保証）のパラダイムは、過去、現在の質に対するQAから、未来に対するQAへと移行してきている。

3. 1.1 過去の質：検査によるQA

3. 1.1.1 過去の質のQA

QAに関して誰でも直感的に理解できるのは

検査によるQAである。製品が良品かどうかをきちんと検査を行ったうえで、検査に合格した製品のみを市場に出すならば、多数の製品の中に一部不良品が混在していたとしても、検査で不良品を排除すればQAは可能である。検査はQAの基本であり、これには3種類のものがある。

* 全数検査：すべての製品を検査することが全数検査である。検査ミスがなければ不良品を排除できる点が利点であるが、時間と費用がかさむのが欠点である。全数検査は100%検査である。しかし、現実にはミスが生じるので全数検査を数回行う数百%検査が行われる。例えば、ダブル・チェック（200%検査）やトリプル・チェック（300%検査）などである。このため時間もコストもかなり必要となることを忘れてはならない。

* 抜取検査：製品をロットという集団（母集団）にまとめたうえで、ロットの中から一部（サンプル、標本）をn個抜き取って、それを調べた結果でロットの合否を決定する検査である。合格としたロットにも若干の不良品が混入しており、不合格としたロットにもたくさんの良品が混入している。具体的な方法には様々なものがあり、多少の不良品の混入が許される場合には時間短縮やコスト低減に有効な検査である。

* 無検査：ほとんどの製品が良品である場合に

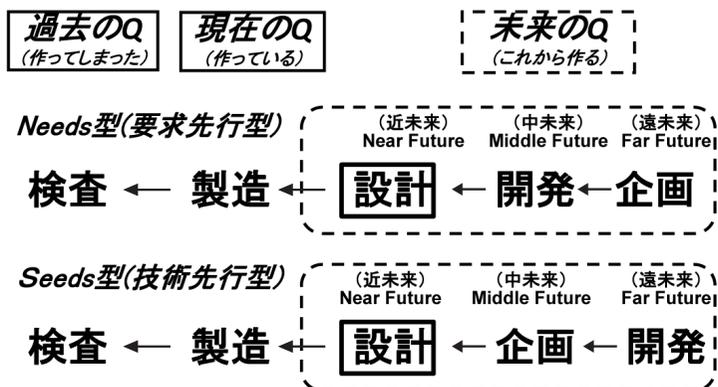


図6 質（クオリティ）の時制（テンス）

は、無検査で出荷することができる。万一出荷した製品の中に不良品があった場合には、それに対して手厚い対応（新品との交換、不良品に伴って発生した費用の負担、慰謝料の支払いなど）をする。このようにマクロ的に見て敢えて検査をしない方が合理的なアプローチになるという場合もある。

3. 1.1.2 過去の質の限界

検査は極めて重要なものではあるが、製品は既に作られているわけであるから、そこで扱っているのは過去の質である。検査は良品を選別しているだけで良品を作っているわけではないことに注意が必要である。

3. 1.2 現在の質：管理（工程管理）によるQA

3. 1.2.1 現在の質のQA

製品を作っているのは工程（製造工程）である。したがって工程を管理すればQAが可能である。工程管理の方法には、管理図による管理と工程能力指数の把握がある。もし不良品を作ってしまったら、その原因を調べて対策をとり再発防止をする。これを繰り返せばやがてほとんど不良品を作らなくなる。そもそも不良品を作らなければQAは万全である。そして、不良率が低ければ抜取検査で十分であるし、不良率が徹底的に低ければ無検査でもQAは可能である。ただし、不良率がかなり低くても管理図による管理と工程能力指数の把握は必要である。

*管理図：管理図は工程が管理状態（普段通り）かどうかを判断する統計的な道具（図、チャート）である。この図を用いると、工程が管理状態かどうかの判断ができる。管理状態でないとは判断される場合は異常発生と考えて原因追究と再発防止対策をとる。

*工程能力指数：管理図が管理状態を示した場合に、工程は安定していると判断することができる。このとき、工程からとったデータでヒストグラムを作成し、そのデータから工程能力指数を計算する。この値が十分に大きければ（1.33以上を基準とすることが多い）不良がほとんど発生しないと判断される。その場合には無検査でQAができるが、これは工程が

管理状態にある場合に限られるので、無検査の場合には必ず管理図を用いて工程が普段通りかどうかを監視しなければならない。^{[4],[7]}

3. 1.2.2 現在の質の限界

工程を管理することで不良率をある程度は低減することができる。しかし、不良率を十分に低減できるかどうかはケース・バイ・ケースである。また、作りやすさ、コストの安さ、本質的なばらつき（製造現場が最大限の努力をした場合に達成できるばらつき）の小ささは工程管理の良し悪しとは別の問題であることも忘れてはならない。

現場がたいへんな努力をしても不良率が十分に小さくならない場合は、設計に起因する問題である。また、不良率が十分に低くても、作りにくい、コストが高いという問題を抱えることが少なくない。これらの問題もまた設計に起因する問題である。質やコストに関する根源的な問題は設計にあり、現場がいくら努力しても設計の本質的なレベル以上に不良率の低減やコストダウンは不可能である。そこで次に設計について議論する。

3. 1.3 未来の質：設計・開発・企画によるQA

3. 1.3.1 未来の質のQA

設計という行為の段階ではまだ製品は存在していない。設計は、これから作る製品の条件を決めるので、ここでの質は未来の質である。未来自体はさらに、近未来、中未来、遠未来の3つに分類する必要がある。

設計・開発・企画には、図6における上段のNeeds型開発と、下段のSeeds型開発の2通りのケースがある。

* Needs型開発（要求先行型）：最初に顧客要求把握が行われ、それに基づいて企画し設計するアプローチである。すなわち、近未来が設計、中未来が開発、遠未来が企画になる。

* Seeds型開発（技術先行型）：最初に開発が進行し、開発が成功したらそれに基づいて企画し、その後に設計するというアプローチである。すなわち近未来が設計、中未来が企画、遠未来が開発になる。

本研究は近未来の設計を対象としているために、いずれのケースにも対応が可能である。

3. 1.3.2 未来の質の課題

設計は近未来の質であり、設計因子を明らかにし、各々の因子の水準を決定する。しかし、現状では、これを感覚によって主観的に進める場合が少なくない。科学的な手法に基づいた合理的な設計手法の確立が未来の質の課題である。

3. 1.4 質の時制のパラダイム・シフトに伴うQMの課題

QMにおいては、過去の質の検査から現在の質の管理へ、そしてさらに未来の質の準備へとパラダイム・シフトが生じている。過去の質および現在の質のQMに関する手法は確立してきているが、未来の質のQMに関する手法はまだ確立していない。未来の質の準備のためには科学的な手法、つまり実験で客観的なデータを取り、それに基づいて設計因子の水準を合理的に決定する設計手法の確立が課題となる。

3. 2 適合のパラダイム・シフト：規格→要求

QMでは基準を設けて、それに適合しているか否かで質を評価する。その際、設定される基準が、規格 (specifications) から要求 (needs) へと変化している。

3. 2.1 規格適合と要求適合

品質の最初のパラダイム・シフトはプロダクト・アウト (product out：生産者主義) からマーケット・イン (market in：使用者主義) への移行であった。これに伴い、S (satisfaction：満足) というキーワードが注目され、以下の順番で発展していった。

- ①CS (customer satisfaction：顧客満足)
- ②ES (employee satisfaction：従業員満足)
- ③SS (stakeholder satisfaction：関係者満足)

プロダクト・アウトでは製品規格が何よりも重要で、これを満たすか満たさないかでクオリティの良し悪しが決定された。しかし、競合品が多数登場した場合には、良品であっても買っ

てもらえないという事態が発生し、この事実は規格適合が必ずしもクオリティと同値ではないことを明らかにした。規格適合品が受け入れられないのは、規格が顧客要求を反映していないことを意味している。設計者 (エンジニア) が一方的に作る規格は顧客要求と不整合となるリスクが高い。

このため、顧客要求を把握し、それと整合するように規格を作るマーケット・インが登場した。マーケット・インでは要求適合を満足と考え、クオリティは顧客満足と定義した。これに伴い、様々な要求に対応するために多数の品揃えが良いとされた。様々な要求に個別に合った多数の品揃えは顧客満足を高めるからである。

3. 2.2 クオリティのピラミッド構造 (満足の構造)

マーケット・インの考えを理論的に整理すると図7に示す「クオリティのピラミッド」という構造になる。クオリティのピラミッドのキャップ・ストーンにあたるのは製品/サービスではなくS (satisfaction：満足) である。顧客は製品・サービス自体が欲しいのではなく自らの要求を実現する手段として製品・サービスを購入すると考えると、それが要求を十分に実現したかどうかは満足で測るのが妥当となる。真のクオリティは満足で、製品・サービスの固有のクオリティは代用クオリティということになる。この代用クオリティを真のクオリティである満足と整合させるためには、顧客要求を反映した規格にしな なければならない。そのために

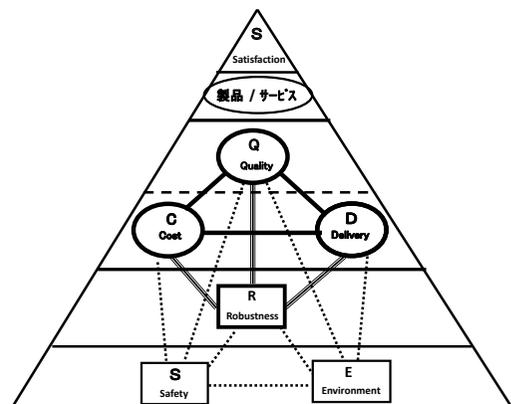


図7 クオリティのピラミッド

は、設計という業務は設計エンジニアだけではなく顧客と直接接する営業・販売・サービスなどの部門の人々とのコラボレーション（協働）であることが不可欠となる。

3. 2.3 適合のパラダイム・シフトに伴う QMの課題

規格適合の基本は「作る専門家（設計者）」の考えで作成された規格である。しかし、要求適合の基本は「使う専門家（使用者）」の要求に切り替えられなければならない。製品やサービスは顧客要求を実現する手段でしかなく、その真のクオリティは顧客の満足で評価される。そして、満足の実態は製品やサービスの存在の状態（Q, C, D, R, S, E）に依存するため、図7に見られるような構造を把握し、設計に反映する手法を確立することがQMの課題である。

3. 3 対象のパラダイム・シフト：特定層→多数層

QMにおいては、従来は特定の層に焦点を合わせた特化設計が行われてきた。しかし、近年はコスト削減、環境負荷の低減の視点から、多数の層に焦点を合わせる必要が生じている。

3. 3.1 特定層に焦点を合わせた設計

特定の層に焦点を合わせて設計する場合は、特定の層にとっての満足度の最適化（最大化）を目指す特化設計を行うことになる。特化設計は特定の層のみのクオリティのピラミッドを想定し設計を行うため、その層の要求に高い適合性をもった商品を開発できるという特徴がある。

3. 3.2 多数層に焦点を合わせた設計

日本の高度成長期においては徹底的に客を層別し、層ごとに製品を用意したという経緯がある。この方法は特化設計であり、層別により、各々の層にとっての満足を実現することができる。しかし、この方法は多数の品揃えが必要となるため、多くの経営上の問題を孕んでいる。たとえば、資材調達、段取替え、管理の手間や費用がかかる、品切れのリスクが高い、在庫を多量にかかえるなどである。

また、QMの基本的な考え方に「後工程はお客様」というものがある。この考えは、客の連鎖構造を考えて連鎖的QAを行うことにより、断裂のない貫いたQAの実現を目指すものである。この考えに立って、顧客に製造者や納入業者や地域住民などを加えると顧客全体が複雑な構造となり、もはや層別によるアプローチ自体が成り立ちにくくなる。

さらに、層ごとには各々のクオリティのピラミッドは機能するが、様々な層に対して一つの製品を提供する場合には多数の層の満足の間でトレード・オフが生じるために全体として機能することが困難になる。すなわち、多数の層に対して1つの製品でS（満足）が得られるようにしなければならないという状況のもとでは、満足度を基盤としたアプローチには限界があり、特化設計では対応が困難となる。

一方、使用する原材料に関しても層がある。したがって、特定の原材料に限定することは調達の点でもコストの点でもリスクや不利を抱えることになる。このため幅広くいろいろな原材料に対応できる頑健設計を行うことが望ましい。^{[1], [2], [3], [9], [10], [12], [14], [15], [16]}

3. 3.3 対象のパラダイム・シフトに伴う QMの課題

3. 3.2で述べたように、関係者が増えると立場の違いから生じる必然的なトレード・オフが避けられなくなるためにS（満足）というキーワードでの設計は困難を極める。

このため、品質のパラダイム・シフトに伴うQMの課題は、多数の関係者の満足を目指すことが要求される複雑なマーケット・インに対応できる設計手法を確立することである。すなわち、特定対象の満足実現から関係者の合意形成への移行、品揃えの細分化から統合化への変化に対応可能な設計手法を確立することである。

3. 4 因果構造のパラダイム・シフト：要因→役割

QMにおいては質に影響を与える要因を把握して整理することが不可欠である。このための手法として従来は特性要因図（図8）を用いてきたが、今後はこれだけでは対応することがで

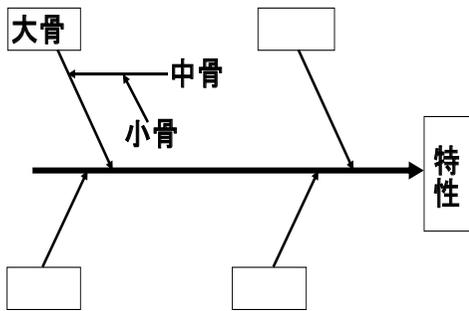


図8 特性要因図（因子の体系的記述）

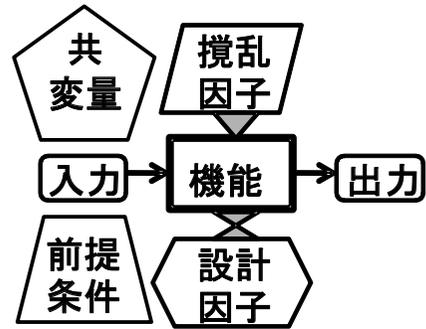


図9 機能構造図（因子の役割的記述）

きない。

3. 4. 1 特性要因図

世界的に広く用いられている手法である特性要因図は、要因（重要な因子）に関する漏れのないリストアップの手法である。特性要因図はあるレベル以上のメンバーが作成すれば、大骨・中骨の構造に多少の相違はあっても、小骨レベルで登場する要因はほぼ同じものになる。つまり特性要因図は漏れのない要因のリストアップに優れている。しかし、この図は機能の観点から因果関係を構造化しているわけではない。ここでいう機能とは「相互に関連し合っただけで全体を構成している各因子が有する固有な役割」（広辞苑第五版、岩波書店、1998）という意味である。

3. 4. 2 機能構造図

図9に示す機能構造図では各要因が出力（特性）に対していかなる役割を担っているかを整理することができる。特性要因図でリストアップした要因が同じ（子骨レベルで同じ）であっても、機能構造図にする場合には、作成者の置かれている状況や考え方に依存するために必ずしも一様ではない。

設計に焦点を合わせると以下の5種類の因子の役割が存在する。

- ①入力因子：期待出力を得るために使用者によって毎回変更されるもの
- ②設計因子：設計で決定後はその水準は製造時に固定されるもの

③攪乱因子：通常は野放しだが実験時は制御されるもの

④共変量（交絡因子）：通常も実験時も野放しであるもの

⑤前提条件：通常も実験時も一定の水準で変化しないかあるいは一定の水準にとどめるように制御されるもの

そして、この役割は原則としてエンジニアが割り当てるものである。それは単なる技術の問題ではなく、技術をベースにした経営（マネジメント）の問題である。役割を決定するうえでは以下のものが重要な背景となる。

- *技術力：持っている技術で制御可能か
- *経済力：資金的に制御可能か
- *政治力：ルール変更や他との交渉のもとで制御可能か
- *取り巻く状況：社内外の状況（情勢、環境）のもとで制御可能か

例えば攪乱因子に関して2つの立場がある。

①そもそも技術的に制御ができない

技術力がないので制御できない、経済的事情（資金不足など）で制御できないといった場合は、対象である要因は攪乱因子になる。しかし、技術力を高めたり経済的事情を克服すれば攪乱因子は前提条件あるいは設計因子にすることができる。技術力は社内で高めずに他から購入することも考えられる。その意味では単なる技術的な問題ではなく、経済的な問題あるいは政治的な問題ともいえる。

②技術的には制御が可能であるが経済的・政治的な事情により敢えて制御しない

段取り替えが不要になる、作業が楽になる、原材料・部品などの調達が楽になる、コスト低減ができる、品揃えを少なくすることができるといった理由で、前提条件（基盤となる条件について一定の水準になるように制御していたもの）や設計因子を取って制御せずに攪乱因子にすることがある。

3. 4.3 因果構造のパラダイム・シフトに伴うQMの課題

要因記述（整理）手法においては、要因を単に体系的にリストアップする特性要因図から、要因を分類して構造化する機能構造図へのパラダイム・シフトが生じている。

機能構造図を用いて設計を行う場合は、入力因子、設計因子、攪乱因子、共変量（交絡因子）、前提条件を同時に考慮することが要求される。このため、込み入った構造を有する多数の要因を同時に扱える数理的方法を用いた設計手法を確立することが課題となる。

4. 調和設計の特徴と構造

4. 1 調和設計の特徴

第3章においてQMにおけるパラダイム・シフトにより、以下の課題があることを述べた。

- 課題1：科学的な設計方法を確立すること
- 課題2：要求適合に対応できる設計方法の確立
- 課題3：多数の関係者に対応できる設計方法の確立
- 課題4：多数の要因を同時に扱える設計手法の確立

以上の課題を視野に入れたうえで、数理的方法を用いた総合的設計方法を確立することが必要である。そこで本章では調和設計を提案し、これらの課題を踏まえてその特徴を述べる。

4. 1.1 数理計画法の利用

設計とは、設計因子を定めたいうでその水準を決定する行為のことであり、決定された結果（設計因子の水準の組合せ）のこともある。設計は勘や経験や思い付きに頼ることが決して少なくはなく、とりあえず設計したも

のが結果的に良ければよしとされることが実務の世界ではよくある。しかし、これは一種のギャンブルで高いリスクを伴う。

調和設計ではデータに基づいた論理的な手続きを用いる科学的な設計を行うことを原則としている。科学的な設計（行為としての設計）では数理計画法を用いることが多い。その場合には最適解が設計（結果としての設計：決定された設計因子の水準の組合せ）となる。科学的設計においては、指標は設計因子の関数であり、これらを制約条件と目的関数という形で定式化し、目的関数を最適化する形で解を求める。最適化とは、制約条件を満たすうえで目的関数を最大化・最小化・目標化することである。^[6]

また、設計においては、主体が客体に関する指標（特性と項目）の総合的な様子を考慮して設計因子を定めたいうでその水準を決定する。考慮する指標が少なれば設計は単純であるが、指標が多いと設計は複雑になる。この点についても数理計画法を用いれば、対応が可能である。

したがって、調和設計は数理計画法を用いるため、課題1、課題4に対応が可能である。

4. 1.2 満足から合意へのシフト

前述のように、近年は製品やサービスの設計を巡って多数の関係者（ステークホルダー：人格・法人格を持った主体や客体）が存在し、扱う指標が多いという状況が一般的になっている。このような状況では複雑な設計になり、トレード・オフが入り乱れるために以下の3点の困難が発生する。

- *関係者が（主体、客体がともに複数）多数存在する場合には満足というキーワードでの設計は困難である。
- *主体が一人でも客体が複数の場合には満足というキーワードでの設計は困難である。
- *主体が一人で客体が単数でも指標が多数の場合には満足というキーワードでの設計は困難である。

そこで、本研究では、以下のキーワードを取り上げてこれらを盛り込むことにより調和設計というアプローチを強化する。

- *理解：自分及び人の状況や立場を知ること。

*納得：理解したうえで事態を受け入れること。

*譲歩：自分の主張を譲ること。

*要求：相手に譲歩を願い出ること。

*合意：関係者の意見が一致すること。

調和設計では多数の層の間の満足に関するトレード・オフを解決する方法として満足から合意に切り替えることで対応する。この方法により、課題2、課題3に対応することが可能になる。そして合意を形成するために以下の2段階の対応を行う。

①可能ならば相互の間の乖離を減衰する。

②それが困難な場合には相互に譲歩する。

乖離を定式化してその最小化を試みる方法は頑健設計である。ときには最初の求解で得られた解で合意が形成されることもある。しかし、解が得られない、あるいは得られた解では合意が形成できない場合には、次のアプローチとして相互に譲歩することを協議する必要がある。

4. 1.3 合意形成の具体的なステップ

合意形成 (consensus-building) は以下に示す4つのステップを経て実現される。

①可視化 (Visualization) して、

②理解 (Recognition) して、

③協議 (Consultation) して、

④納得 (Consent) して、

⑤合意 (Consensus) に至る。

①可視化

- ・幾何的なもの、すなわち画像で概要 (マクロ) の理解を目指す。
- ・代数的なもの、すなわち数値で詳細 (ミクロ) の理解を目指す。

②理解

可視化によって

- ・自分の状況を理解する
- ・他人の状況を理解する

③協議

- ・譲歩、すなわち相手の状況を理解して自らが譲る。
- ・要求、すなわち自分の状況を理解してもらい相手に譲歩してもらう。

これらの調整をする。

④納得

協議をふまえてその解を受け入れる。満足の意味するものではない。自他の状況を理解したうえで、ある解が妥当なものであるとして受け入れることを意味する。

⑤合意

関係者全員で納得した状態が合意で、合意された解が決定解 (最終解) となる。

4. 1.4 求解のPDCAサイクルの提案

相互に譲歩するためには相手の状況を相互理解する必要がある。相互理解は話し合いで醸成され、それはまさに図10に示すPDCAサイクルを回すことに他ならない。^{[5],[23],[32]} なお、図10には通常の場合の訳 (計画, 実行, 検討, 処置) を括弧の中に示すとともに、話し合いに基づく最適化のステップの場合の意味 (定式化, 求解, 検討, 協議) も示している。

そして、PDCAサイクルを回すというタイプの協調的ディスカッションを行うには、可視化した最適化ツールが不可欠である。近年は優れた数理計画法のソフトが充実しているので、それらを利用すれば数理に悩むことなく可視化が行え、PDCAサイクルを回すことが可能である。^[22]

4. 2 調和設計の構造 (3つのステージと3種の調和)

4. 2.1 3つのステージ (企画化, 模型化, 最適化)

調和設計は3つのステージで構成され、それらを簡潔に表現すると以下ようになる。

1) 企画化 (planning) : 計画立案

- ・全体の枠組の組立

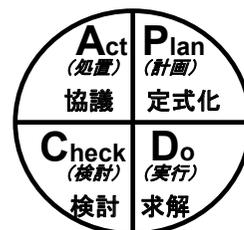


図10 求解のPDCAサイクル

- ・想定モデルが吟味できる過不足ない計画
 - ・その後実験の実施
- 2) 模型化 (Modeling) : 知見獲得
- ・本質を押さえ抹消を捨て去った模型の構築
 - ・その後模型からの知見の吟味
- 3) 最適化 (Optimization) : 合意形成
- ・関係者全員が納得できる解の創出
 - ・その後再現の確認 (Validation)

4. 2.2 設計としての戦術・戦略・政略

行為としての設計の本質を整理すれば「制約のもとで目的を実現する方策を見出すこと」であるため、これは数理的には数理計画法による最適化そのものである。その中身は、①定式化、②求解、③解の吟味、④再定式化という4つのステージがあり、②は数学であるが、①③④はマネジメントである。そしてPDCA最適化とは、定式化を構造的に繰り返して求解を重ねる手続きのことである。

定式化の中核は制約条件と目的関数の設定である。定式化および再定式化にはレベルが存在する。これを軍事用語である作戦という言葉に置き換えると、そのレベルと特徴が明確になる。

作戦には戦術、戦略、政略の3つのレベルが存在する。いずれも制約条件と目的関数のもとで求解するという点では本質的に数理計画法と同じ構造である。

1) 戦術レベルの求解

制約条件も目的関数も所与のもとで求解を行うものが戦術レベルの求解である。数学としての数理計画法は戦術レベルの求解である。制約条件と目的関数の定式化については一応マネジメントに属するものであるが、諸条件を変えることなく（それらを踏まえて）定式化するのは通常のマネジメントであって、以下で述べる高度なマネジメントではない。

2) 戦略レベルの求解

制約条件を変更して（パワーアップして）1段階上のパワフルな解を求めるのが戦略レベルの求解である。制約条件を変えない限り戦術レベルの求解で得られた以上の解は得られない。そして、制約条件を変えるためには

少なからぬ投資と現状の変革が必要になるため戦略レベルの求解には高度なマネジメントが不可欠となる。

3) 政略レベルの求解

目的関数を変更して（それに伴い制約条件も変更することが多い）2段階上の解を求めるのが政略レベルの求解である。政略レベルの求解には①所与の目的関数の式の変更（係数や関数形の変更）や②目的関数それ自体の追加や削除という変更がある。そして①や②の変更のために対外的交渉（他部門や他社との交渉など）が必要となるために、きわめて高度なマネジメントが不可欠となる。

4. 2.3 調和設計における3種類の調和

調和設計には指標間の調和、客体間の調和、主体間の調和の3種類がある。以下、その詳細について述べる。

4. 2.3.1 指標間の調和

指標間の調和とは、複数の指標間のトレード・オフを調整して設計を行うことである。指標間の調和においては、指標は以下の3つに分類されて最適化が実施される。

1) 必須指標

満たすことが不可欠な指標である。必須指標は設計の目的の根幹にかかわるものである。マーケット・インの立場から明らかに不可欠なものは、入出力回帰がCRZを必ず満たさなければならぬということである。顧客の要求を満たさない製品は購入してもらえず、購入されない製品を製造しても経営は成り立たない。一方、製造の立場からは材料の種類間の差は頻繁な段取替えやQAに影響するので、何としても減衰させなければならない。このように設計の根幹にかかわるものが必須指標となる。これは必ず定式化に組み込んで、設計に反映させなければならない。必須指標にはRとQの2つがある。

①R（頑健性）：攪乱因子の水準間の範囲（ばらつき）

②Q（品質）：攪乱因子の全水準間の平均
この両者は常に必須指標である。①を減衰する（小さくする）ことで頑健になり、②を顧客の要求に合わせることで市場に受け入れられ

る。

2) 考慮指標

必須指標に準じて重要な意味をもつ指標であり、必須指標を満たすために時には条件を譲歩する可能性のある指標である。考慮指標にはCDSEの4つがある。これらを定式化に際してできるだけ組み込み、設計に反映させることが肝要である。

3) 把握指標

把握指標は必須指標と考慮指標で設計された結果、どうなるのかを見る指標である。把握指標は考慮指標と同様にCDSEの4つである。考慮指標は定式化に加えられ、把握指標は結果を見るのみで定式化には加えられない。

把握指標も解の水準の影響を受けるので、その状況を把握するために画面に登場させて必ず確認をする。原則は見ているだけであるが、もしその値がクリティカルに問題となった場合には、その次の定式化では考慮指標として定式化に加えることになる。逆に当初は考慮指標であったものが、いろいろな定式化においてほとんど問題のない範囲で動いている場合には敢えて把握指標に変更するという必要もある。コンピュータを用いて求解するといっても調和設計では多数の指標(特性、項目)を扱うためほとんど問題のない範囲で挙動しているものを定式化から外して把握指標として扱うことが求解の演算にとって望ましい。

図11の下半分に考慮指標の例として紙ヘリコプターの設計における生産性、経済性、取り扱い性を示している。いずれの場合も左側の設計より右側の設計の方が優れていることが分かる。

4. 2.3.2 客体間の調和

客体間の調和とは、複数の客体間のトレード・オフを調整して設計を行うことである。客体間の調和には以下のようなものがある。

- 1) 製造諸元：製造の場で制御できないあるいは制御しないものが設計での客体になる。
 - ・材料：純然たる素材で未加工のもの
 - ・部品：材料に加工が加えられたもの
 - ・製法：作業標準、機械・設備ほか
 - ・環境：温度、湿度、水質、塵埃ほか
 - 2) 使用状況：使用の場で制御できないあるいは制御しないものが設計での客体になる。
 - ・使用状況：場合(状況)、誰が、いつ、どこで、何を、どのように
 - ・使用環境：温度、湿度、天候、気圧ほか
- 上記の1)と2)は客体間調和设计で、客体間の差を減衰することになり、頑健設計(ロバストデザイン)となる。^{[20],[21],[22]}

図11の上半分に頑健設計(客体調和)の例として紙ヘリコプターの設計における材料間の乖離の減衰を紹介している。2種類の紙の違いを減衰したうえでCRZを満たす設計が頑健設計である。詳細については6.6で解説する。そし

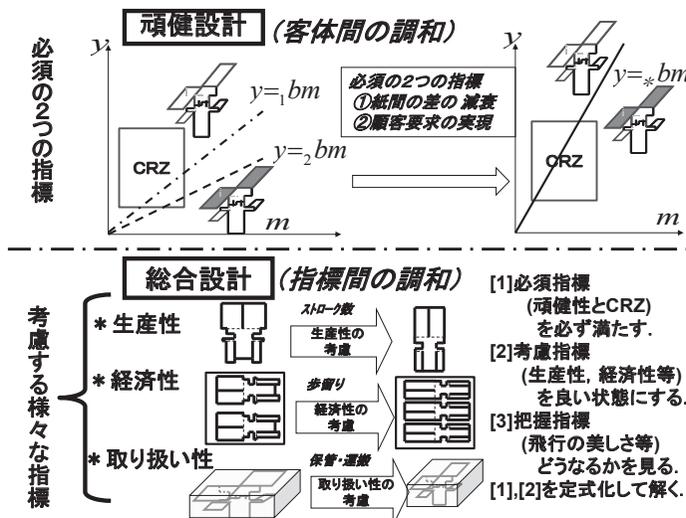


図11 指標間調和と客体間調和

て、これらの必須指標の定式化に加えてすでに述べた生産性、経済性、取扱い性などの考慮指標の定式化も加えたものが、指標間調和と客体間調和を合わせた調和设计である。

なお、関係者である顧客や従業員を客体として配慮した設計を行うことが一般的である。しかし関係者の場合にはできるだけ主体として話し合いの場に同席してもらい、そのうえで次に述べる主体間の調和を行うことが望ましい。

4. 2.3.3 主体間の調和

主体はステークホルダー（関係者）という形で複数になることが少なくない。主体が複数の場合の設計においては主体間の利害に関してトレード・オフが発生するので、主体間の調和が必要になる。

意思決定を行う主体には知識と判断力が必要であるが、主体となり得るものが知識と判断力において不十分であるという場合が少なくない。例えば、使用者と技術者の間には技術や知識の非対称性が存在する。この場合は、知識と判断力が不十分であっても主体となり得るものに対し、情報の理解、発信のための援助をすることで準主体になれるようにし、調和设计に参加できるようにする工夫が必要である。準主体とは厳密には定式化して求解する者ではない。しかし定式化に際しては自分の意見を述べて定式化に反映してもらう形で参加し、複数の求解のもとで複数の解の候補が得られた場合には最終解の選択では積極的に自己主張する者である。

近年の医療における患者の立場がこれにあたる。患者は本来、意思決定をおこなう主体であるべきである。しかし医学の知識と判断力を十分にもっていないため、自力での定式化は困難である。そのため医師が専門知識をもとに定式化をおこない求解して複数の解（治療法）を選択肢として提示する。各解の説明をおこなったうえで患者が解を決定するのが現在のインフォームド・コンセントである。

しかしこの仕組みは時として医師側の説明のバイアス（医師にとって望ましい解へと誘導する）がかかる可能性がある。これからは医療を理解した専門家が加わってニュートラルな状況

で、患者が本当に納得できる選択をおこなえるように調和をはかる方向に向かうことが望ましい。

5. 企画化 (planning)

企画化とは設計全体の筋書（シナリオ）を作成することである。このステージではいかなるモデルを想定するのか、そしてそれをモデル化するにはいかなる実験計画が必要なのかを明らかにする。実験計画は品質設計の出発点である。^[11]

5. 1 企画化と企画

企画化とは、企画（くわだて：何をどうする）という状態にはない漠然とした状態のものを、何をどうするという明確な状態にすることを意味する。すなわち、目的を受け止めて、それを実現するために必要な具体的内容を構成したうえで記述することである。なお、企画化によって得られる結果が企画であることは言うまでもない。

企画化は計画に近いニュアンスをもった言葉である。しかし、本研究では計画という言葉は実験計画およびPDCAサイクルにおけるP（計画）という形で登場するのであえて企画化という言葉を用いる。実際、3つのステージのうち最初のステージである企画化では以後の行動（モデル化と最適化）を含めた全体の構成を行っており、その中には下位のレベルの計画である実験計画とPDCAサイクル（先頭のPは計画）を含んでいるために、相対的に上位レベルの計画になっている。

5. 2 企画化のステップ

企画化は、特性要因図の作成、機能構造図の作成、設計因子（変数）と水準（状態）の範囲の決定、モデルの想定と実験計画の作成、最適化で取り上げる指標とその取扱いの分類の5つのステップで構成される。以下、その詳細について述べる。

5. 2.1 特性要因図の作成

特性要因図のレベルは技術のレベルに依存する。出力に強く影響する因子は漏らさずリストアップしなければならない。

5. 2.2 機能構造図の作成

企画化の核心は機能構造図である。これは技術のレベルに加えてマネジメントのレベルに依存する。出力に影響を与える重要な因子には何があるかについては技術の守備範囲であるが、それらをどの役割に割り振るのかについてはマネジメントの守備範囲である。

5. 2.3 設計因子(変数)と水準(状態)の範囲の決定

設計とは決定すべき変数である設計因子と、それが具体的にとるべき状態である水準を決定することである。すなわち、最初に以下のことを明らかにする。

- ①実現すべきものは何か。
 - ・注目する指標(結果系:特性,項目)
- ②指標に影響するものは何か。
 - ・注目する諸元(原因系:設計因子)
 - ・諸元のタイプ(量的因子,質的因子)
- ③その取り得る範囲は何か。
 - ・量的因子は下限と上限
 - ・質的因子は選択肢(取り得るカテゴリー)

5. 2.4 モデルの想定と実験計画の作成

設計に必要なモデルを想定し、それが変数選択によって構築することが可能な最小の実験サイズの計画を最適計画で組む。ただし、最適計画の多くは非直交計画となるので、可能であれば(余裕があれば)直交計画を組むことが望ましい。しかし直交計画は最適計画に比べて実験数が多くなるので採用が困難になる場合が少なくない。

5. 2.5 最適化で取り上げる指標とその取扱いの分類

取り上げる指標を選定しそれらの関数(説明変数は設計因子)を定め、かつ指標を必須指標、考慮指標、把握指標の3種類に分類することにより最適化の準備を行う。

6. 模型化(modeling)

特性と設計因子と水準が明らかになっても設計はできない。特性と設計因子の関数関係が不可欠であるからである。模型化とは、特性を目

的変数(従属変数)とし、設計因子を説明変数(独立変数)とした関数を導出することである。これは実験・調査に基づいて行われる。一方、項目の方は然るべき人や組織がルールや固有技術に基づいて決定する。前者は主に製品特性や顧客評価などで、後者は製品サイズや費用などである。指標を構成する特性も項目もその関数が決定されればそれに基づいて定式化ができて最適化可能となる。^[24]

6. 1 模型化の方法

模型化の方法は、基本的には実験や調査などでデータをとり重回帰分析の変数選択で模型化する場合と、固有技術的に決定される(例えば微分方程式を解くなどして模型化する)場合がある。

入出力回帰も超回帰も作式が不可欠である。入出力回帰はその式を模型化(基本的な数式化)し、その式の中の母数に関して超回帰式を模型化(上位の数式化)しなければならない。両方の場合において出来上がった数式のことを模型と呼ぶ。

模型化は解析とも言える。解析は様々な取り組みによってデータに基づいた客観的な知見を得ることである。しかし、本研究では設計を行うことが最終目的であるために、次のステージでの最適化において用いる数式モデルを決定することに焦点を合わせているのでこのステージを模型化と呼ぶ。出来上がった数式模型は技術的に納得できるものか、そしてそれから有用な知見を獲得できるかを確認することが必要である。^{[27],[28]}

なお、模型化の過程で様々な知見を得ることは重要なことであり、ときには最終的に得られた最適解(設計)に勝るとも劣らない価値を有する知見を得ることが少なくない。

6. 2 模型化における変数選択の基準

調和設計の模型化は最小二乗法の変数選択によって決定する。その際に用いる基準として代表的なものに以下の3つがある。

- * p値基準(F値基準)
- * 情報量基準:AIC, BICほか
- * 寄与率基準:自由度調整済寄与率, 自由度2

重調整済寄与率

p 値基準は検定や推定と連動している点では便利であるが、近年はシミュレーションによる設計が盛んとなり、この多くの場合にはそもそも誤差がないので p 値を用いることができない。情報量基準は理論的に進んだ基準である。モデルの適合に関する相対的な良さを比較する際には便利であるが、その絶対的な意味が直感的につかみにくい。寄与率基準は誤差がない場合でも使うことができ、かつその意味するところ（変動の説明率）も直感的に理解しやすい。近年盛んに用いられているシミュレーション実験の多くは誤差のないモデルのもとで行われている。自由度調整済寄与率はパラメータの過剰な取込に対してペナルティをかけている点でも優れている。場合によってはペナルティのかけ方がさらに厳しい（情報量基準に近い性質を持つ）自由度 2 重調整済寄与率の適用も検討するとよい。

なお、自由度の調整をしない単なる寄与率はペナルティをかけることがないために過剰な変数選択（無意味な変数の取込）をするので基準として採用できない。

いずれの基準を採用しても、選択方法と追加・削除の水準値の指定が不可欠である。本研究では原則として変数選択方法は変数増減法を採用し、基準は自由度調整済寄与率とし、その追加・削除の水準値を 0.01 とすることを基本とする。しかし、実際には固有技術的な判断を十分に加えて多くの人が納得のゆくモデル化を柔軟に行うことが重要である。

6. 3 模型化の事前チェック

1) run 毎の入出力回帰プロット図のチェック

実験における実施単位あるいはその時の条件のことを run という。各 run 毎に入出力回帰プロット図を作成し、入出力回帰の状態に問題（想定モデルとデータの不整合）がないかをチェックする。線形の想定なのに非線形になっていないか、逆に非線形なのに線形になっていないか。また、原点を通るか否かも重要なチェックポイントである。

2) 攪乱因子の水準毎の入出力回帰プロット図のチェック

攪乱因子がある場合には、攪乱因子の水準ごとにチェックする。1) では個別の run 毎にチェックしたが、ここでは全体として不自然なものがないかどうかをチェックする。

3) 異常値のチェック

直積実験はデータ数が極めて多いためにしばしば異常値が混入する。異常値の存在は模型化を誤りひいては設計を誤るために慎重にチェックすることが必要である。異常値を発見した場合には、それを欠測値として補完するという選択肢も考えられるが、原則としてはデータを取り直すべきである。

6. 4 模型の概要把握

1) 全体寄与率

まず確認すべきは全体の寄与率（自由度調整済寄与率）である。この値が低い場合には実験が失敗であることを認識しなければならない。その場合の原因には以下の 5 つのものがある。

- ① 誤差が大きすぎる。
- ② 重要な因子そのものが落ちている。
- ③ モデル（数式構造）が間違っている。
- ④ 共変量の影響が大きいの。
- ⑤ 複数の層が混在している

2) 選択された変数

選択された変数が妥当かどうかの判断を、固有技術を駆使して行う。選択されるべきものが選択されているか、選択されるべきではないものが選択されていないかをチェックする。一方、変数選択の意外な結果から新しい知見を得ることも少なくない。

6. 5 模型の詳細把握

1) ANOVA (analysis of variance : 分散分析) における個別の寄与率

全体の寄与率とは別に ANOVA における個別の寄与率を確認する。直交実験の場合には、個別の寄与率は重要な情報を与えてくれる。これを固有技術的に吟味することで、ときには新しい知見を獲得することができる。

2) 係数の符号

選択された変数が妥当でその寄与率に納得がいても、変数の前の係数の符号が固有技術と整合しているかどうかのチェックは重要であ

る。もし符号の正負が逆転していたら、それは実験のクリティカルなミスかあるいは固有技術の情報の大きな誤りを意味している。

3) 係数の絶対値

最後に押さえないければならないのは係数の絶対値の大きさである。係数の符号が整合しただけでは不十分で、係数の絶対値の大きさまでもが整合していなければならない。これが不整合であれば、クリティカルなミスや固有技術の情報の大きな誤りはないにしても、実験の一部の失敗や固有技術の不完全さを意味している。

6. 6 因子の分類 (4種類: 減衰, 調整, 両性, 無効)

以上のチェックとともに、変数選択の結果から各因子のタイプを把握することが重要である。ここで簡単な説明のために、回帰式がゼロ点比例式 (原点を通る1次式) のもとで攪乱因子が1因子2水準の場合で紹介する。入力 m と出力 y に関する攪乱因子の第 i 水準の入出力回帰式を以下のように示す。

$${}_i f(m) = {}_i b m \quad (3)$$

$i = 1, 2$

攪乱因子の i 水準の回帰式の係数 ${}_i b$ の設計因子 x_1, \dots, x_p による超回帰式を以下に示す。

$$\begin{aligned} {}_i b &= {}_i g(x_1, \dots, x_p) \\ &= {}_i c_0 + \sum_{j=1}^p {}_i c_j x_j + \sum_{j=1}^p \sum_{j < k} {}_i c_{jk} x_j x_k + \sum_{j=1}^p {}_i c_{jj} x_j^2 \end{aligned} \quad (4)$$

これをダミー変数 z ($z = 1, -1$) を用いて平均 (Average) と乖離 (Divergence) の構造で表現すると以下のとおりである。

$$\begin{aligned} b &= Ave(x_1, \dots, x_p) + Div(x_1, \dots, x_p) z \\ &= (a_0 + \sum_{j=1}^p a_j x_j + \sum_{j=1}^p \sum_{j < k} a_{jk} x_j x_k + \sum_{j=1}^p a_{jj} x_j^2) \\ &\quad + (d_0 + \sum_{j=1}^p d_j x_j + \sum_{j=1}^p \sum_{j < k} d_{jk} x_j x_k + \sum_{j=1}^p d_{jj} x_j^2) z \end{aligned} \quad (5)$$

(5) 式はカッコでくくられた2つのパートで構成され、前半が平均パートで後半が乖離パート (攪乱因子の効果) である。

上記の式の構造に基づいて変数選択の結果より選択された因子を以下の4つのタイプに分類することができる。

- ①減衰因子：乖離パートでのみ選択された因子
- ②調整因子：平均パートでのみ選択された因子
- ③両性因子：両方のパートで選択された因子
- ④無効因子：まったく選択されない因子

望ましいアプローチは、まず減衰因子で攪乱因子の影響を減衰して (第1ステップ)、その後調整因子で平均を最適化 (第2ステップ) するという2ステップ法である。しかし、多くの場合には選択された因子のほとんどが両性因子である。この場合でも、数理計画法を用いると攪乱因子の影響を減衰したうえで平均を最適化することが可能である。

7. 最適化 (optimization)

7. 1 最適化の方法

データに基づいた科学的アプローチに依って立つところのQMの立場からすると、設計因子の水準を決めることを意味する設計とは最適化にはほかならない。^[22]

このステージでは数理的には制約条件を満たした実行可能解の中から目的関数を最大化・最小化・目標化 (目標最接近化) するものを選択する。

7. 2 複数のシナリオと複数の解と再現性の確認

設計とは行為という観点から見ると設計因子の水準を決定することであり、これを数理的にとらえると求解ということになる。求解は柔軟であるべきである。したがって、シナリオを複数用意し、各シナリオのもとで求解する。その結果複数の解 (設計の候補) が得られるが、そのことは重要である。解はあくまでも推定 (つまり仮説) なので、その後再現性の確認が必要である。必ずしも解は再現するとは限らないので、複数の解を試して少なくとも一つ以上は

再現させることが必要である。もし複数の解が再現した場合には、話し合ってそこから一つを選択すればよい。もちろん、事前に優先順位をつけておいて、再現した中で最も優先順位の高いものを採用するというアプローチも有効である。

7. 3 求解のPDCAサイクルによる最適化(設計)

求解の前半は定式化であり、求解の後半は解の検討(吟味)である。解の検討(吟味)で解が受け入れ難い場合には再定式(定式化の変更)を行う必要がある。以上のことを図10に示しているPDCAサイクルで整理すると、以下のような求解のPDCAサイクルとなる。

P 定式化：制約条件と目的関数の設定

D 求解：数理計画法で全因子の水準決定

C 検討：解が受け入れられるかどうかの吟味

A 協議：解が受け入れ難い場合の相互の譲歩

これは最適化を何度も繰り返して合意を形成する取組(アプローチ)である。目的は関係者の合意を目指した最適化なので、これをPDCA最適化と呼ぶ。各々のプロセスでは定式化が行われ最適解が得られるが、それは数理的には最適解であってもあくまでも調和設計的には過渡解(暫定解)でしかない。求解のPDCAサイクルを回した結果最終的に得られた解をPDCA最適化と呼ぶ。これは数理的な方法(数理計画法)を手段として用いているが、本質は合意形成の話し合いの結果を意味している。以下にPDCA最適化の詳細を示す。

7. 3.1 P (Plan)：定式化

1) 目標と定式化

PDCA最適化では定式化を何度も行って合意を形成する。このためには、再定式化が柔軟にできる背景が必要である。定式化において具体的に問題になるのは目標値(水準の値)である。しかし、目標値にはそれを支配する上位のものとして目的があり、そしてそれを支える下位のものとして手段がある。目標を変えても目的が達成できるのであれば目標の変更は許容され

る。しかし、変更した目標が実現できるためには実現を可能にする手段の存在が不可欠である。目的が明示されかつ実現手段が備わっているという2つの条件が同時に満たされていない場合には、目標値を変更することはできない。

以上のことを整理すると以下ようになる。

* 目的：成し遂げようと目指す事柄

・ 展望(ビジョン)：目指すところが何処か

・ 使命(ミッション)：為すべきことは何か

* 目標：何がどれくらい(結果の水準を示す)

* 手段：何をどうやって(原因の行動を示す)

・ 道具：用いるものは何か

・ 方法：やり方は如何様か

2) 制約条件と実行可能解

最適化以前にそもそも実行可能解があるかどうかかが問題である。つまり最適化を考えることのできる候補があるかどうかの検討が必要である。この時に取り上げられるのが制約条件である。必要な制約条件をすべてクリアしなければ、最適化自体を検討することができないからである。必要な制約条件をすべてクリアしたものを実行可能解という。後述する最適解は実行可能解の中から選ばれる。

3) 目的関数と最適解と準解

実行可能解が複数ある場合にその中から最適解を選択(決定)する。そのために必要なのが目的関数である。これを最大化、最小化、目標化(目標に最接近させること)のいずれかの最適化をしたのが最適解である。

制約条件が厳し過ぎる場合は実行可能解が存在しなくなり必然的に最適解はあり得ないことになる。しかし、近年の数理計画ソフトはシミュレーションに基づいて解を探索するために実行可能解がない場合でもとりあえず試みた結果を画面に表示することが一般的である。それは実行可能領域の外にはあるがこの領域に近いものであることが多い。したがって、正式には解ではないが実務的には受け入れられる場合が少なくない。これを準解と呼ぶ。当初の制約条件を緩めれば準解は解(実行可能解)となるので制約条件の緩和が実施可能であればそれを採用することができる。

4) 多目的最適化

多目的最適化はしばしば不適切な場合があ

る。数理的には意味があっても実務的には意味がなく、理解が困難な場合が少なくない。その多くの方法は多数の目的関数を一つの上位の目的関数にまとめて（線形結合して）最適化するものであるからである。線形結合する際の係数はある意味の重みである。しかし、そもそも互いに単位（性質）の異なる多数の目的関数を一つにまとめること自体が無理（水と油）と考えられる場合が少なくない。また、満足度関数を用いて各目的関数に扱ひの差別化を行って最適化する方法も近年良く用いられるようになってきているが、この場合の満足度の設定の仕方もいろいろあり、必ずしも明快なものではない。

調和設計では原則として単一目的の最適化を話し合いながら繰り返し、その過程で得られる解あるいは準解が関係者の合意を得ればそれを解とするアプローチを推奨する。しかし、ときには多目的最適化で求解を試みることも有用である。その結果得られた解（ヒントの解、たたき台の解）で合意が得られる可能性があり、合意が得られなくてもその解が次の再定式化に有用な情報を与える可能性があるからである。

5) 再定式化

再定式化には2つの場合がある。

①解が得られない。

実行可能解がない場合、いいかえると制約条件が厳し過ぎる場合である。この場合は譲歩に基づく制約条件の再定式化が必要となる。

②解は得られたが合意は形成されない。

目的関数の最大化の結果に満足できない場合、最小化の結果に満足できない場合、目標化の結果に満足できない場合が考えられる。この場合は目的関数の限界（最大値、最小値）を把握し、目的関数の受け入れを再考慮する。すなわち、制約条件を大きく譲ったり外したりして目的関数の限界を見極めることが必要である。

【注】 制約条件である指標を譲歩するために、制約条件を目的関数として扱ったうえで他の条件を制約条件として、この場合の制約条件をギリギリまで緩めたりあるいは制約条件から外したりして、当該の指標の限界（最大値、最小値）

を見る。この情報（認識、理解）で合理的な譲歩を考えることができる。

再定式化において重要なことは自分が関係する指標だけでなく、他者の関係する指標も含めて情報をとること（認識、理解）である。これらの試行は大型の画面に写して、関係者全員が見て情報を共有することが望ましい。

7. 3.2 D (Do) : 求解

求解にコンピュータを活用することで、短時間で解が求まり、解を可視化できる。数理的には制約条件が厳しいと実行可能解が存在せず、それ故に解が存在しないことが起きる。このような場合に、既に述べた準解が実務的に重要なものとなる。その際、準解がどの程度の結果を得ているのかを見ることは重要である。ときには、実務的な観点からその準解が合意を得て解として採用されることもあり得る。あるいは、準解を見ることで状況を把握し、次の定式化（再定式化）の貴重な情報になることも少なくないと考えられる。

7. 3.3 C (Check) : 検討

満足を抑えて譲歩するためには自分に関連のある指標の限界（最大、最小）と他の立場の人々に関連のある指標の限界を知ることが必要である。このためには、関係者が一堂に会して、それぞれの立場ごとに気になる指標の限界を求めようとする。

もし、相互の限界を知らない場合には、被害者意識に立った後ろ向きの譲歩とならざるを得ない。本当はある状態であって欲しかったが、無理にその状態から離れざるを得なかったという受け止め方になる。

以上の点から、主体の各々の立場や客体・指標の各々を優先した場合の限界を把握することは重要なことである。コンピュータを用いれば限界（最大値と最小値）を知ることが比較的容易である。

7. 3.4 A (Act) : 協議

検討の段階でいろいろ試みて各種の指標（自分に関連する指標、他に関連する指標）の限界を知ったうえで、

- ・どこまで譲歩するか
 - ・どこまで要求するか
- を考えてその具体的な水準を明確にすれば、
- ・得られた解は納得すべきものなのか
 - ・得られた解は更に求解を試みるべきか

を合理的に判断することができる。また、解を巡っての議論も情緒的ではなく合理的に運ぶことができる。

前節7. 2で述べたように、解を決定するには唯一の解を求めたうえで再現の確認に臨むのではなく、複数の解を求めたうえで再現の確認を通して最終的な解を決定するのが合理的である。求解により得られた解はあくまでも仮説であり、必ずしも再現されるとは限らない。このため、再現の確認結果を見たとうえで検討するという余地を残す必要がある。そのために複数のシナリオのもとに複数の解を作成し再現性を確認するのが現実的である。

8. 複葉型紙ヘリコプターの調和設計の例

本章ではこれまでの内容を明確に示すために第2章で紹介した紙ヘリコプターを取り上げて調和設計のアプローチを具体的に示す。なお、紹介する内容は図3に示す9個の設計因子の場合で、慶應義塾大学において実際に行った例である。

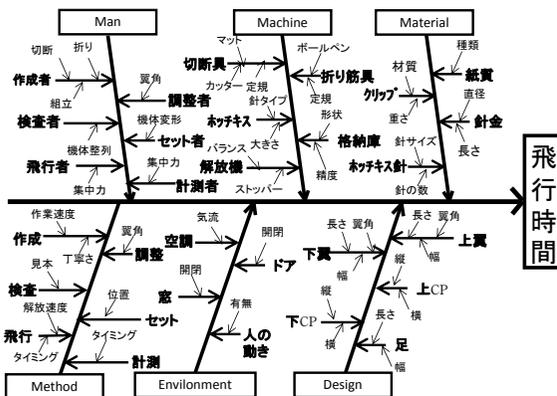


図12 紙ヘリコプター飛行の特性要因図

8. 1 企画化

複葉型紙ヘリコプター事例のより深い理解のために企画化については詳細な紹介を行う。

8. 1.1 特性要因図の作成

特性要因図を図12に示す。この図は汎用的に使えることを目的として詳細に記述したものである。

8. 1.2 機能構造図の作成

紙ヘリコプターの機能構造図を図13に示す。機能構造図は以下のように理解する。すべてに先立つのは使命である。これは製品（ハードなシステム）・サービス（ソフトなシステム）が果たすべき任務である。今回の例で取り上げる使命は「空間のある場所から別の場所への垂直移動」である。この使命を果たすために今回採用するのはヘリコプターによる降下（回転降下）という機能である。しかし、パラシュートによる降下（非回転降下）という機能を採用することもできる。

機能構造図の中核となるのは役割（役目）である。役割が実行されることで実現する結果が出力（特性）である。そして

- ①出力を実現するために
 - ②出力を自在に制御・操縦するために
- 用いる手段が入力である。

各々の因子の役割とは製品が全体として機能

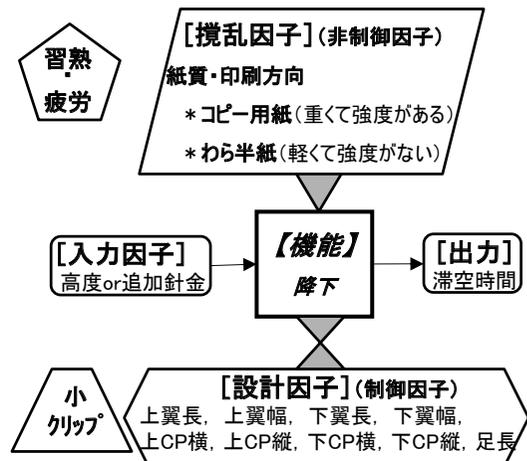


図13 機能構造図の例（紙ヘリコプター）

を果たす際に各々の因子が果たす役目のことで、有益な役割と有害な役割とがある。有益な役割は設因子で、有害な役割は攪乱因子と共変量（交絡因子とも呼ばれる）である。前提条件は基盤となる与えられた条件なのでそのもとで考えるしかないために有益でも有害でもなく中立な役割となる。

設計因子は製品の諸元（因子、要素）であり、これが決定されることで製品の仕様が決定的になることとなる。攪乱因子は制御できない・敢えてしないために出力を攪乱するもので、その影響（攪乱）を減衰したいのでそうできるように設計因子を決定する。前提条件はその状態が一定のもので、とりあえず出力に影響はしない。ただし、この水準が異なる時空間ではすべてが様変わりすることに注意が必要である。共変量は実験時にも制御されないため、放っておくと変化して出力を乱すものである。もし一定の状態に固定することができれば前提条件となり、実験で攪乱因子として取り上げてその影響を減衰すればその有害さは抑え込める。なお、攪乱因子とは共変量と同様に通常は野放しで奔放に動くものであるが、その影響を減衰できる設計を行うために実験の段階ではその条件を何としても制御しなければならぬものである。

以上の内容を見やすく整理して以下に示す。

- ①使命：[垂直移動] 製品の果たすべき任務。そもそも使命を果たせない製品は受け入れられない。
- ②機能：[降下] 使命を果たすためのはたらし。一つの使命に対して採用可能なはたらしは様々なものが考えられる。
- ③機構：[回転降下] 機能の実現のメカニズム（仕組み）。今回とりあげているのは紙ヘリコプターで回転降下であるが、紙パラシュートという非回転降下（等速落下）も選択肢の一つである。また、エレベータ（昇降機）やクレーン（起重機）による移動も選択肢になり得る。これらの場合には機能が[運搬]になる。
- ④出力：[滞空時間] 機能が果たされることによって実現する結果。
- ⑤入力：[解放高度、追加針金] 出力を自在に操縦するために用いる手段あるいは出力

を実現するための元手。

- ⑥因子役割：製品が全体として機能を果たすために各々の因子が受け持つ役目（仕事）。
- ⑦設計因子：製品を決定するための諸元。
- ⑧攪乱因子：[紙質]、[印刷方向] 制御できない／敢えてしないために出力を攪乱するもの。
- ⑨前提条件：一定状態に固定する条件（能動）、一定状態にとどまっている条件（受動）。
 - ・飛行装置（解放型）
 - ・クリップ（X社製サイズ小）
 - ・室内気流なし（空調停止）など
- ⑩共変量：放っておくと変化する⇒一定の状態に固定すれば・とどまれば前提条件。
 - ・習熟（⇒開始前にウォーミングアップする）
 - ・疲労（⇒きちんと休憩をとる）など

製品の設計においては、目的としての使命が最も重要であり、手段としての機能や機構は他のものに柔軟に変更することが可能である。今回は降下という機能を採用したが、運搬という機能の採用も考えられる。これを選択した場合にはエレベーター（昇降機）やクレーン（起重機）を用いての移動となる。降下という機能を採用した場合でも手段はパラシュートもあることはすでに述べたとおりである。

使命に対して機能が選択され、それを実現する機構が特定されると製品の枠組みが明らかになる。その後、製品の諸元の決定が必要になる。なお、機能を選択しても機能を発揮する機構（メカニズム）の開発がなされなければその先へは進めないが、本研究は機構の開発は固有技術ものと位置付けて、これは所与のものとする。

8. 1.3 設計因子（変数）と水準（状態）の範囲の決定

取り上げる設計因子は図3に示す9因子で、それぞれの水準（各2水準で単位はmm）は以下のとおりである。

- [1] 上翼長： x_1 (40, 70)
- [2] 上翼幅： x_2 (20, 30)

- [3] 足長: x_3 (70, 80)
- [4] 下翼長: x_4 (20, 40)
- [5] 下翼幅: x_5 (15, 30)
- [6] 上CP縦: x_6 (5, 10)
- [7] 上CP横: x_7 (30, 50)
- [8] 下CP縦: x_8 (5, 10)
- [9] 下CP横: x_9 (55, 65)

8. 1.4 モデルの想定と実験計画の作成

1) 入出力関数のモデルの想定

顧客にとって希望する滞空時間の実現が重要で、このために入力（例えば高さ）を変えて飛行することになる。このとき、高さ m （入力）と滞空時間 y （出力）の関係式 $y = b \times m$ が必要である。これを入出力回帰と言い、これにより滞空時間を自由に実現することができる。

ときには要求が一定値の場合も存在するが、これは入出力がある状態で固定されたものと考えればよい。しかし、このような場合は実際には少なく、設計はあくまでも出力を入力で制御する形で行う。そうすれば、要求値が様々なものが存在してもそれらの全てに対応ができる。最初から一定値を目指して設計を行うと、その値以外には対応ができないことになる。

2) 超回帰（設計因子）のモデルの想定

入出力回帰は傾き b で決まるが、この傾きは機体条件によって決まってしまう。例えば、翼長 x_1 と翼幅 x_2 で設計するとすれば、傾き b と翼長 x_1 および翼幅 x_2 の関係式（例えば $b = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_{12} x_1 x_2$ ）が必要になる。今回は翼長と翼幅の水準範囲が狭いので積項を無視することができる。もし両者の水準範囲がかなり広ければ、積項に加えてそれぞれの2次項も必要となる。これを超回帰（入出力回帰の回帰係数の回帰）という。設計因子がたくさんあれば超回帰式はさらに複雑なものになるが、それは設計の自由度を増すことでもある。

3) 実験計画の作成

取り上げる実験（初心者用の入門実験）では、実験水準の振りが狭いために積項（交互作用項）や2次項が考えられないために用いる計画は混合系直交表L12である。

実験の概要は以下のとおりである。

- ①内側計画：攪乱因子は1因子（紙質）で2

水準（コピー用紙とわら半紙）

- ②内側計画：L12（混合系直交表）
- ③設計因子：8.1.3の9因子（各2水準）
- ④入力因子：高度で4水準（単位cm）
80, 120, 160, 200

8. 1.5 指標（設計因子の関数）の設定

指標とは設計因子の関数で、設計因子の水準が決まるとその影響を受けて状態が決まるものである。紙ヘリコプターの設計で取り上げる3種類の指標の例は以下のとおりである。

- ①必須指標：顧客要求、紙質による差
- ②考慮指標：面積、体積、段差の有無
- ③把握指標：着陸位置、飛行の美しさ

顧客要求は必ず満たさなければならない。そして材料間の差の影響を受けない設計は納入業者が多い場合に有利である。安い材料を選択して購入ができ、工程では材料が混在しても段取り替えが不要だからである。

図14に段差と面積の計算式を示している。段差は作り易さに大きく影響し、面積は材料費、梱包費、保管費、運搬費などに大きく影響する。したがってこれらは設計において考慮指標として注目しなければならない。

8. 2 模型化

紙数の都合により重要な結果に焦点を合わせて要約した形で紹介する。以後登場する図15から図18はいずれもJMP®10（SAS Institute Inc., Cary, NC, USA）のもとで著者らが開発したHOPE Add-In for JMPによる結果である。^[22]

8. 2.1 模型化の事前チェック

結果を図15に示す。12の全てのrunで特に問題はなく、原点を通過する線形（ゼロ点比例式）と判断できる。

8. 2.2 模型の概要把握

変数選択の結果を図16に示す。図より以下の2点から模型の概要の把握が可能である。

- ①変数選択の概要
- ②選択された変数の係数

なお、全体の寄与率（自由度調整済寄与率）

- ① 上翼幅と上CP横を揃えたい場合

$$\text{上翼幅} \times 2 - \text{上CP横} = 0$$

- ② 下翼幅と下CP横を揃えたい場合

$$\text{下翼幅} \times 2 + \text{足幅}(25) - \text{下CP横} = 0$$

- ③ 下翼長と足長を揃えたい場合

$$\text{下翼長} + 35 - \text{足長} = 0$$

- ④ 面積の計算式

$$\begin{aligned} & \text{上翼長} \times \text{上翼幅} \times 2 + \text{足長} \times \text{足幅}(25) \\ & + \text{下翼長} \times \text{下翼幅} \times 2 + \text{上CP縦} \times \text{上CP横} \\ & + \text{下CP縦} \times \text{下CP横} + (8 - \text{下CP縦}) \times 25 \end{aligned}$$

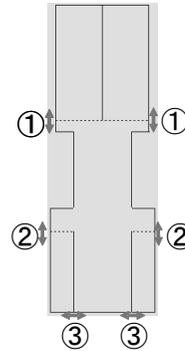


図14 段差と面積の計算式

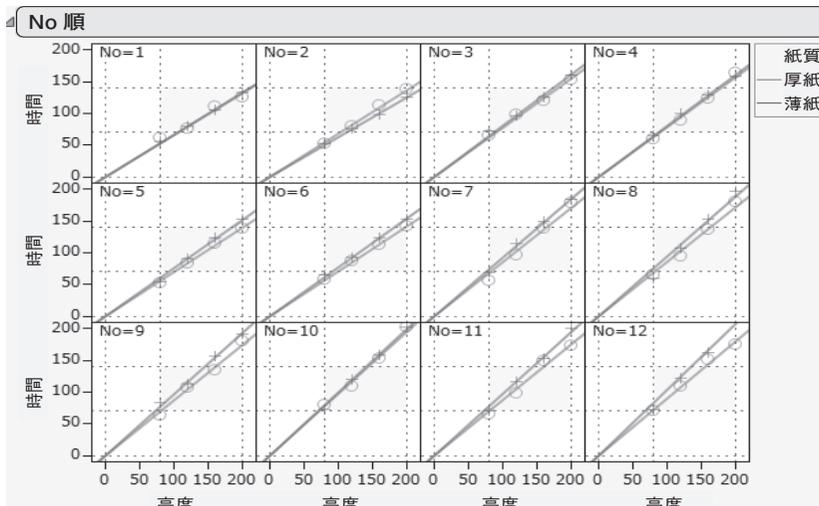


図15 回帰プロット (runごと)



図16 変数選択の結果

は0.9224でこの模型の説明力は十分に高い。

図16にある変数の係数より様々な有用な式を示すことができるが、本章では概要が理解できればよいのでそれらを割愛する。

8. 2.3 模型の詳細把握

分散分析表（紙数の都合により割愛）より上翼長の寄与率が約75%と極めて高いので、製作に当たってはこのサイズや翼の出来映え（翼角、表面の平滑など）がばらつかないように十分に注意する。

8. 3 最適化

紙数の都合により重要な結果に焦点を合わせて要約した形で紹介する。

8. 3.1 求解の基本的なアプローチ

1) 最初は本質に焦点を合わせて求解する。

① **【必須指標】** のみで設計を行なう。

入出力回帰の回帰母数に関連する指標（平均、範囲等：これらは特性）

2) 次に視野を広げて求解する。

② **【考慮指標】** も加えて設計を行なう。

コスト、生産性、安全性、環境等を重視し定式化に入れる指標（これらは項目）

3) その上で定式化には入れていなくても設計の結果によって受ける影響についても把握しなければならない。

③ **【把握指標】** に致命的問題がないことを確認する。

コスト、生産性、安全性、環境などで定式化に入れない指標（これらは項目）

4) もし把握指標の値が問題になったならば、その時には考慮指標に格上げして定式化に加えなければならない。

8. 3.2 最適化の例

本項では具体的な調和设计の例として2つのシナリオの要約を示す。なお、紙面の都合により実験データおよび変数選択により決定した数式は割愛する。

8. 3.2.1 求解の例1 [シナリオ1] (段差を考慮しない解)

シナリオ1では必須指標として紙質間の違いの減衰と顧客要求域 (CRZ) の実現をとりあげ、考慮指標として面積の最小化のみを取り上げ、把握指標としては3箇所段差の様子を見ることにする。

【必須指標】

1) 紙質間の違いを減衰する。

紙質間の範囲（差、ばらつき）を0にする。

2) 顧客要求域 (CRZ) を満たす。

もし解がCRZを通らなければ、その際には傾きに関して以下の制約条件（両側不等式）を付けなければならない。

* 0.65以上（横が200の位置で縦が130以上）

* 0.875以下（横が80の位置で縦が70以下）

【考慮指標】

3) 面積をできるだけ小さくする。

上記の2つを満たし面積を最小にする。

【把握指標】

4) 3箇所の段差を見ておく。

①上部段差

②中央部段差

③下部段差

図17に示す解より明らかなように、段差を考慮しないので面積はかなり小さくなる。ただし段差が3箇所もあるために製造において作りにくくなるのが図17の中央部に示している機体デザインから明らかである。

8. 3.2.2 求解の例2 [シナリオ2] (段差を考慮した解)

シナリオ2ではシナリオ1に加えて3箇所の段差を把握指標から考慮指標に格上げする。このことで作り易さを追求する。ただし、そのトレード・オフで面積が大きくなる。

【必須指標】

1) 紙質間の違いを減衰する。

紙質間の範囲（ばらつき）を0にする。

2) 顧客要求域 (CRZ) を満たす。

もし解がCRZを通らなければ、その際にはシナリオ1と同様に傾きに関して以下の制約条件（両側不等式）を付けなければならない。

* 0.65以上（横が200の位置で縦が130以上）

* 0.875以下（横が80の位置で縦が70以下）

【考慮指標】

- 3) 段差①を無くす.
- 4) 段差②を無くす.
- 5) 段差③を無くす.
- * それぞれを0とする制約条件をおく.
- 6) 面積をできるだけ小さくする.

上記の5つを満たして面積を最小にする.

【把握指標】

このシナリオでは把握指標はなしである. 図18に示す解より明らかなように, 段差がないために作り易くなっている. しかし段差を考慮したのでその影響から面積は大きくなっている.

8. 3.3 合意に向けての協議

ここで取り上げた2つのシナリオ以外にもさらにシナリオを作ることもできるがそれについては割愛する. 複数のシナリオのもとで解が複数得られたらどれが良いか協議して決めることになる. あるいは更なる提案も考えられる.

例えば3箇所の段差のうち1箇所の段差を譲れば面積は更に小さくなるし, もし2か所の段差を譲れば面積はさらに一層小さくなる. これらの状況については再定式化を行って解を求めれば明らかになる. そして図17 (全ての段差を譲った場合の結果) と図18 (全ての段差をなく

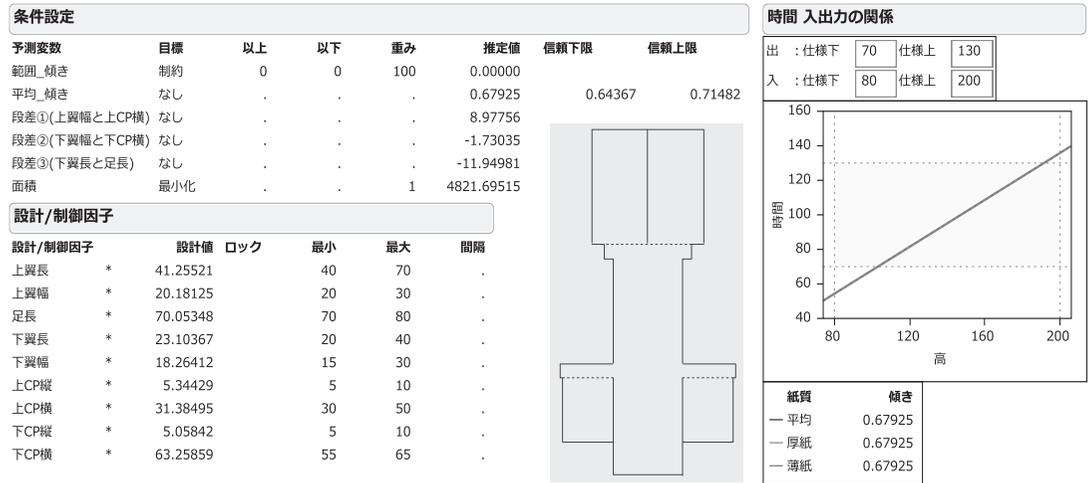


図17 段差を考慮しない設計

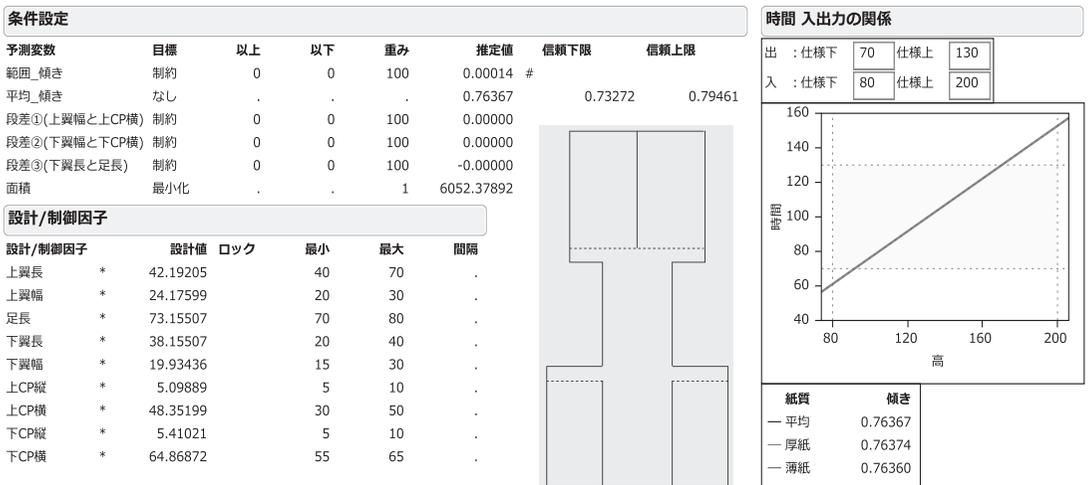


図18 段差を考慮した設計

した場合の結果)を加えて全体的に検討を加えて相談をすればよい。このような過程を通して十分に話し合った上で最終的に合意されたものがPDCA最適解なのである。厳密にはこの解は推定(仮説)でしかないので、必ず再現性の確認を行なう。

8. 3.4 再現性の確認

その後再現性の確認を行った。2つの解(候補)を各5機ずつ製作して飛行したうえでメジアンをとったところ(データ割愛)、両者ともほぼ推定値通りであった。シナリオ1の解は面積が小さい点は魅力であるが段差が多く製作しにくい。その点、面積がある程度大きくはなるが段差がないシナリオ2の解が多く関係者に支持されたのでシナリオ2の解を採用した。

ところで模型化に基づく最適化は次のアプローチも可能である。それは実験水準の幅を広げてさらに良い解を求めることで、このとき得られる解を外挿解という。取り上げた事例では上翼幅 $\times 2 =$ 下翼幅 $\times 2 +$ 足幅とすることができ、第4番目の段差もなくす(上翼と下翼を揃える)ことができ、さらに作り易くなる。ただし外挿解なので再現しないかもしれない。しかし試みる価値は十分にある。

9. まとめと今後の課題

調和設計とは目的、目標、主体、客体、設計因子、指標を明らかにしたうえで、数理計画法を用いて全体として調和のとれた条件決定をするアプローチである。本研究は調和設計の考え方を示すとともに、その具体的なアプローチとして企画化(計画)と模型化(解析)と最適化(設計)の3つのステージを提案した。

今回提案したアプローチを具体的な分野の事例に応用することが今後の課題である。製品に適用することは勿論であるが、サービスの分野への応用も不可欠である。

特に提案したアプローチの医療サービス分野への応用は重要な課題である。様々な患者が共通して用いるハードウェアの設計には調和設計のアプローチが有用と考えられるため、バリアフリー、ユニバーサルデザインと調和設計を対比し、特徴を整理したうえで、具体的な応用方

法を検討する必要がある。また、インフォームド・コンセントは治療に関する調和設計の一形態(患者・家族が準主体の場合)であり、また職種の異なる高度な専門職の混成チームで行われるチーム医療の治療計画はまさに調和設計である。これらに対して今回の提案を理論的に発展させた上で応用することでより一層望ましい治療の設計アプローチが可能となると考えられる。

【参考文献】

- [1] Joseph, V. R. and Wu, C. F. J. (2002): "Robust Parameter Design of Multiple-Target System", *Technometrics*, 44, [4], 338-346.
- [2] Joseph, V. R. (2003): "Robust Parameter Design With Feed-Forward" *Technometrics*, 45, [4], 284-292.
- [3] 河村敏彦(2011):「ロバストパラメータ設計」, 日科技連出版社.
- [4] 河村敏彦, 高橋武則(2012): 誤差因子に繰り返しがある場合の望目特性に対するパラメータ設計, Research Memorandum No.1157(統計数理研究所), pp.1-12.
- [5] 木暮正夫(1988):「日本のTQC」, 日科技連出版社.
- [6] 久保幹雄, 田村明久, 松井知己(2005):「応用数理計画ハンドブック」, 朝倉書店.
- [7] Kume, H., Takahashi, T. et al.(1985): *Statistical Methods for Quality Improvement*, AOTS.
- [8] Miller, A. and Wu, C. F. J. (1996): "Parameter design for signal-response systems: a different look at Taguchi's dynamic parameter design", *Statistical Science*, 11, [2], 122-136.
- [9] 宮川雅巳(2000):「品質を獲得する技術」, 日科技連出版社.
- [10] 宮川雅巳(2006):「実験計画法特論」, 日科技連出版社.
- [11] Montgomery, D. C. (2001): *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons.
- [12] Mori, T. (2011): *Taguchi methods: Benefits, Impacts, Mathematics, Statistics, and Applications*, ASME PRESS, New York.
- [13] Myers, R.H., Montgomery, D.C. and Anderson-Cook, C. M. (2009): *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization*

- Using Designed Experiments (3rd ed.)*, Wiley, New York.
- [14] Phadke, M. S. (1989): *Quality Engineering using Robust Design*, Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey.
- [15] Shoemaker, A. C., Tsui, K. L., and Wu, C. F. J. (1991): "Economical experimentation method for robust design", *Technometrics*, 33, [4], 415–427.
- [16] 田口玄一 (1976, 1977): 「第3版実験計画法 (上) (下)」, 丸善.
- [17] 高橋武則監修 (1980): 「応用スキー解析」, WISE PRESS.
- [18] Takahashi, T. (2003): "Robust design for mass Production", *Journal of Materials Processing Technologies*, 143–144, pp.68–73.
- [19] Takahashi, T. and Saito A. (2005): "Education Of Robust Parameter Design by Twin Rotor Paper Helicopter", *Proc. of International Conference on Quality '05 Tokyo*, CD proceeding.
- [20] Takahashi, T. (2009): "Robust Design by Hyper-regression Optimization", *Proc. of the 7th Asian Network for Quality Congress, Tokyo*, pp.668–677.
- [21] Takahashi, T. (2009): "Quality Design and Evaluation Based on Hyper Structure for Quality Management", *Proc. of the 7th Asian Network for Quality Congress, Tokyo*, pp.1502–1511.
- [22] Takahashi, T. (2010): "HOPE Theory and JMP Software for Robust Design", *Discovery Summit 2010*, pp.1–20.
- [23] 高橋武則 (2010): "顧客要求域とPDCA型設計", JSQC第93回研究発表会発表要旨集, pp.103–106.
- [24] 高橋武則 (2010): "複数の特性の結合設計", JSQC第93回研究発表会発表要旨集, pp.53–56.
- [25] 高橋武則 (2010): "HOPE (階層構造最適化) を用いた設計における最適解の摂動的変更による上位の最適化", JSQC第40回年次大会, pp.109–112.
- [26] 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.
- [27] 高橋武則 (2011): "解像度の高い階層解析", JSQC第95回研究発表会発表要旨集, pp.233–236.
- [28] 高橋武則 (2011): "頑健設計のための分離型設計", JSQC第95回研究発表会発表要旨集, pp.241–244.
- [29] 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.25–28.
- [30] 高橋武則 (2012): "非線形入出力の解析と設計", JSQC第100回研究発表会発表要旨集, pp.29–32.
- [31] 高橋武則, 河村敏彦 (2012): "多水準をもつ誤差因間の交互作用を考慮した望目特性のロバストパラメータ設計", Research Memorandum No.1160 (統計数理研究所) pp.1–11.
- [32] TQM委員会 (2008): 「TQM–21世紀の層が追う「質」経営」, 日科技連出版社.
- [33] Wu, C. F. J. and Hamada, M. (2009): *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization (2nd ed.)*, New York.