



Discovery Summit Japan 2023 論文集

2023年11月17日(金)
グランドハイアット東京

JMP、その他の JMP Statistical Discovery LLC の製品名・サービス名は、米国およびその他の国における JMP Statistical Discovery LLC の登録商標または商標です。®は、米国の連邦登録を受けていることを意味します。その他記載のブランド名および製品名は、それぞれの会社の商標です。

本論文集の一部または全部を無断転載することは、著作権法上の例外を除き、禁止されています。
本論文集の内容を実際に運用した結果の影響については、責任を負いかねます。

目 次

| | |
|---|-----|
| 日本における乳がん患者の経済毒性に関連する要因 | 4 |
| ～患者と医師の観点からの比較～ 佐伯 澄人（がん研究会 有明病院） | |
| 問題解決と課題達成のための質問紙調査と仮想実験 | 26 |
| 高橋 武則（統計数理研究所） | |
| 最適計画による仮想実験データの層別分析 | 56 |
| 川崎 昌（桜美林大学） 高橋 武則（統計数理研究所） | |
| 済生会病院における医師の働き方に関する実態調査データの分析 | 75 |
| 佐村 紫帆（慶應義塾大学） | |
| PDCAサイクルに基づくコイン射撃を用いた能動型データサイエンス教育 | 83 |
| －問題解決と課題達成－ 小川 昭（目白大学） 高橋 武則（統計数理研究所） | |
| 設計パラダイムとしての「超設計」の理論と技法 | 110 |
| 高橋 武則（統計数理研究所） | |

※ 本論文集は、Discovery Summit Japan 2023 の発表のうち、提出のあった論文を掲載している

日本における乳がん患者の経済毒性に関連する要因

～患者と医師の観点からの比較～

Factors associated with financial toxicity of breast cancer patients in Japan

A Comparison of Patient and Physician Perspectives

佐伯 澄人¹

Sumito SAEKI

【要旨】

本研究は、日本における乳がん患者の治療に関連する経済毒性（Financial toxicity; FT）についての包括的な調査を行い、その結果を分析した。調査の対象は、日本全国における研究協力施設に通う乳がん患者、患者会や SNS を通して協力を仰いだ乳がん患者、および日本乳癌学会の会員である医師とした。FT の程度を測定するために特定のスコアリングシステム（日本語版 COST）が使用された。事前に FT に関連するさまざまな要因を探索するべく多様な観点からアンケート調査を実施した。アンケート結果はいくつかのテーマごとに分類し、主成分分析をしたうえで項目としてまとめ、多変量回帰分析を通じて FT に寄与する要因を特定した。同時に、医療費に関する情報支援の十分性を患者と医師の双方がどのように受け止めているかを調査した。情報支援の充実性について地域による偏りがあるか調査し、医師による情報支援の充実性に寄与する因子を特定した。

調査結果から、FT に影響を与える主な要因は直近の医療費の支払いであり、その他の要因には病気の進行度（ステージ）や治療に関わった診療科の数や抗がん剤治療歴などが含まれた。また、収入、年齢、家族の支援といった要因は FT に負の影響を及ぼすことが明らかになった。興味深いことに、患者と医師の間には、医療費に関する情報支援の認識に大きなギャップが存在し、患者は十分なサポートを受けていないと感じている一方で、医師は適切なサポートを提供していると考えていることが判明した。また、FT が上昇するにつれ、患者の期待する情報支援の充実性が低下する傾向が認められた。患者の受け止める情報支援の充実性については特定の県で他のいくつかの県との比較で有意差があることが示された。さらに、医師の情報支援充実度に影響する因子として、医療費についての知識、説明時間や説明することの意義の認識が影響した。

これらの結果は、乳がん患者の FT に対する対策の重要性を強調し、情報支援の充実、医師によるより深い理解、そしてプロフェッショナル間の協力による患者の経済的負担の軽減と個別化されたサポートの提供が必要であることを示唆している。

¹佐伯 澄人（Sumito SAEKI） がん研有明病院 E-mail: sumito.saeki@jfc.or.jp

Abstract

This study conducted a comprehensive survey on financial toxicity (FT) associated with breast cancer treatment in Japan and analyzed its results. The survey targeted breast cancer patients attending research facilities across Japan, patients who collaborated through patient associations and social networking sites, and physicians who are members of the Japanese Breast Cancer Society. The Japanese version of the Comprehensive Score for Financial Toxicity (COST) was employed to measure the extent of FT. A diverse range of questions were administered to explore various factors related to FT. The survey responses were categorized into several themes, and principal component analysis was performed before grouping them into items. This was followed by multivariate regression analysis to identify factors contributing to FT. Additionally, the study investigated how both patients and physicians perceive the adequacy of information support regarding medical expenses. The survey also examined whether there was a regional bias in the perceived adequacy of information support and identified factors contributing to the effectiveness of information support provided by physicians.

The results indicated that recent medical payments were the primary factor affecting FT, along with other factors such as disease progression (stage), the number of departments involved in treatment, and history of chemotherapy. Conversely, factors like income, age, and family support were found to negatively impact FT. Interestingly, a significant gap in the perception of information support for medical expenses existed between patients and physicians, with patients often feeling under-supported while physicians believed they were providing adequate support. Moreover, as FT increased, patients' perceived adequacy of information support tended to decrease. Significant differences in perceived information support were observed among certain prefectures. Additionally, factors influencing the adequacy of information support by physicians included knowledge about medical expenses, time spent on explanations, and recognition of the importance of providing explanations.

These findings underscore the importance of addressing FT in breast cancer patients, highlighting the need for enhanced information support, deeper understanding by physicians, and collaborative efforts among professionals to alleviate financial burdens and provide personalized support to patients.

【キーワード】 経済毒性、乳癌、情報支援、主成分分析、回帰分析、日本乳癌学会班研究

Keywords: Financial Toxicity, Breast Cancer, Information Support, Principal Component Analysis, Regression Analysis, Japanese Breast Cancer Society Group Study

1. はじめに

乳がん患者の数は年々増加し^[1]、現時点において日本人女性の 9 人に 1 人が生涯の中で罹患することが報告されている^[2]。これに伴う検診の精度向上^[3]や包括的な治療方法、パーソナライズされた治療の必要性が強調されている^{[1][4]}。一方で、乳がん患者は他のがん患者と比べて若い傾向にあり^[5,6]、治療期間や経過観察期間が増加し、医療費などの直接的な負担に加えることに加え^{[7][8]}、副作用の治療^[9]や妊孕性温存（妊娠機能の保存）^{[10][11]}、働き盛り世代における罹患を原因とする失業による収入の損失^[12]などの間接的な負担につながっている。経済毒性（Financial toxicity; FT）は、世界中の乳がん患者にとって顕著な問題であり^{[13]-[15]}、特に米国では乳がん患者への医療費に関する情報支援の欠如も課題となっている^{[16]-[19]}。日本においても、婦人科がん患者の FT と生活の質との関連についての報告があるが^[20]、乳がん患者における FT と医療費に関する情報支援の実態や問題点は明らかにされていない。そこで、本研究では日本の乳がん患者における FT に関連する要因を特定し、医療費に関する情報支援の十分性を評価することを目的とした。

2. 方法

本研究は、2019 年度 日本乳癌学会 班研究『日本における乳癌治療による経済的負担への意識に関する研究』の分担研究の一つとして行なわれた。

2.1. 患者調査

乳がん治療を受けた患者を対象にアンケート調査が行った。その内訳として入院中または通院中の患者、または治療を完了（寛解）した患者が含まれた。患者の同意を得た上で参加を受け入れた。調査は班員が所属する施設を含めた日本全国の 18 施設（10 の主要病院と 8 のクリニック、具体的な名称は非公開）を中心に行われ、その規模や地域を問わず、調査対象地域は全国に広がっていた。予想される回答率を基に、参加施設から 2,000 人の患者を対象にすることを旨とした。調査は 2020 年 12 月から 2021 年 4 月にかけて実施した。患者は日本乳癌学会（Japanese Breast Cancer Society; JBCS）より配布された QR コード記載のカードないしパンフレットを参照し、アプリケーションにアクセスした。一部の QR コードは患者会や SNS を通じて提供された（図 1）。

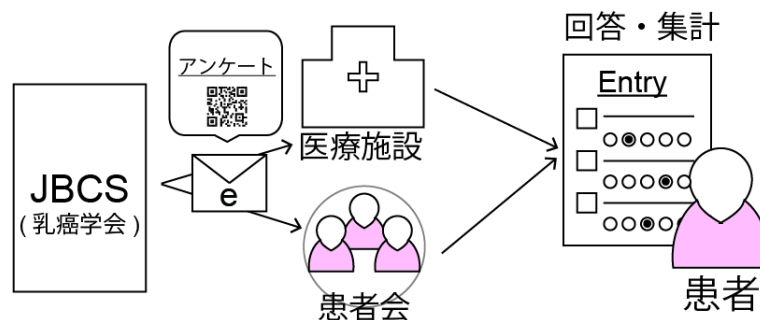


図 1 患者へのアンケート方法

アンケート項目は JBCS 班研究メンバーと共同で検討し、患者向けに 107 項目からなる包括的なアンケート票を作成した。アンケートはアンケートアプリ Questant (MACROMILL, INC, 東京) を用いて実施した。アンケートには、患者の背景に関する 23 個の質問、経済毒性に関わる設問 11 個、医療費に関する情報支援についての医師と共通する 2 個の質問が含まれ、これらを本研究のために抽出した (図 2)。これらの設問について事前にパス図モデルを設計した (図 3)。

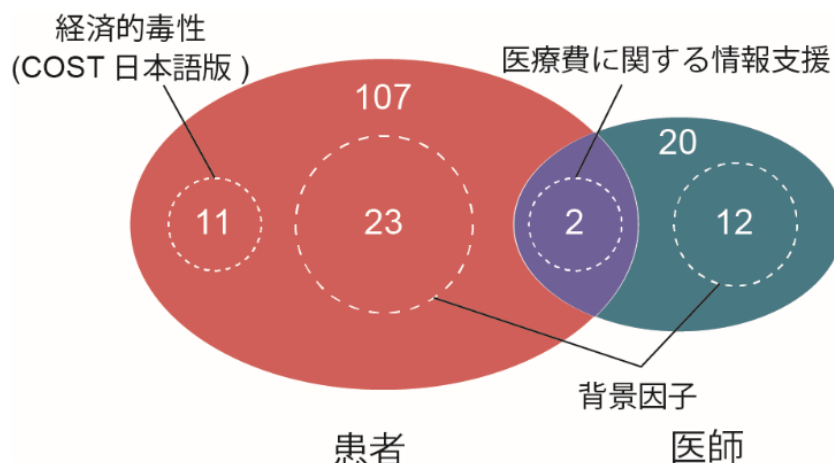


図 2 患者・医師へのアンケート採用項目

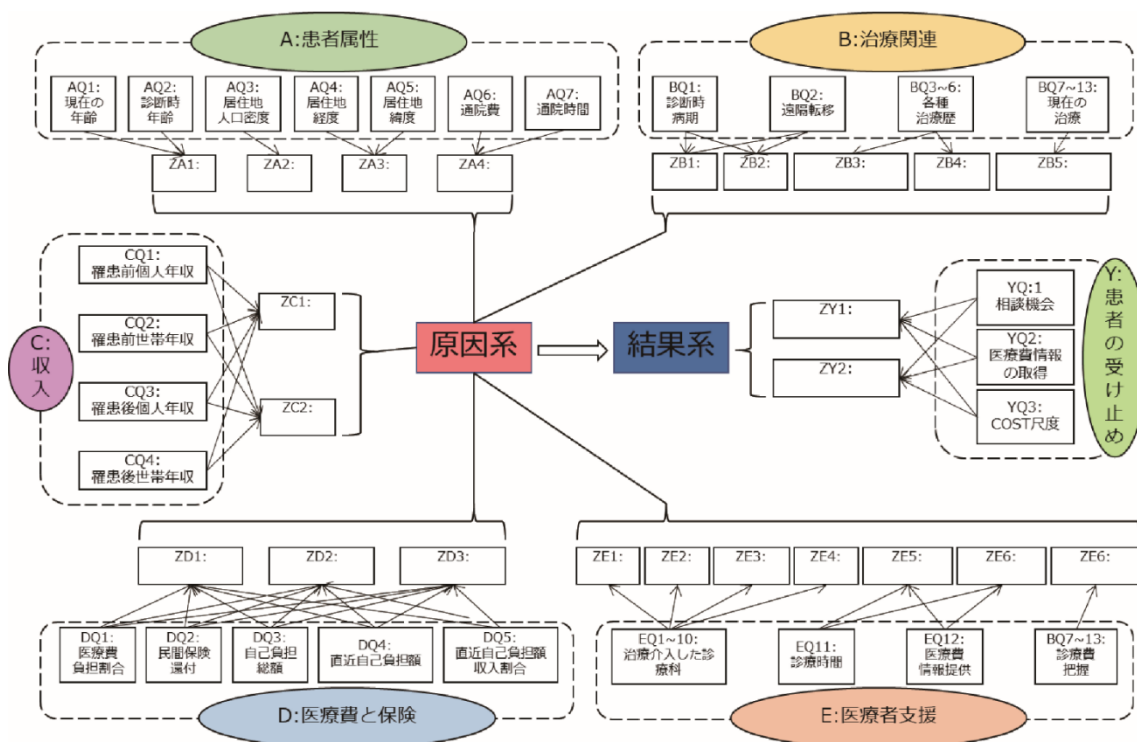


図 3 患者アンケートパス図

最終的に設問は7つのグループに分類し、以下に記述される方法で主成分分析 (Principle Component Analysis; PCA) が行われた (図4)。ヒトを対象とするすべての手続きは、1964年のヘルシンキ宣言とその後の改訂に準拠し、本研究は当院の倫理審査 (受付番号 2020-GA-1151) を経て承認され、各協力施設もこれに準じた。

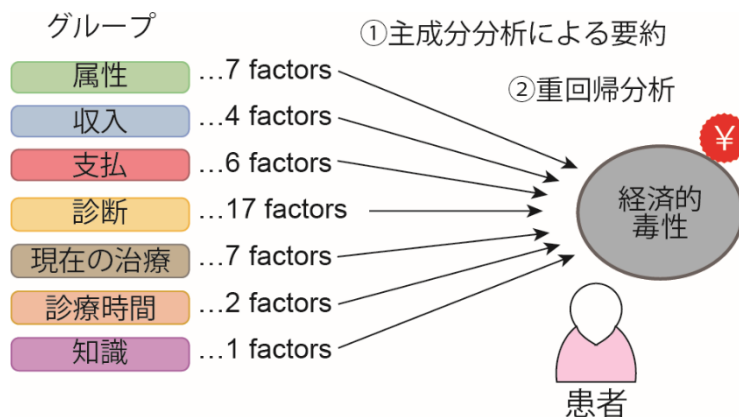


図4 患者アンケートにおける主成分分析後の重回帰分析のフローチャート

2.2. 医師調査

本研究は、JBCS 会員である様々な専門分野の医師を対象に行われた。医師は JBCS から公式メールを通じて参加を招待された (図5)。医師調査は患者調査と同様の形式で行われた。JBCS の会員数に基づき、目標とする参加医師数は 500 人と設定された。本研究では、直接の患者・医師間の対応は必須としなかった。

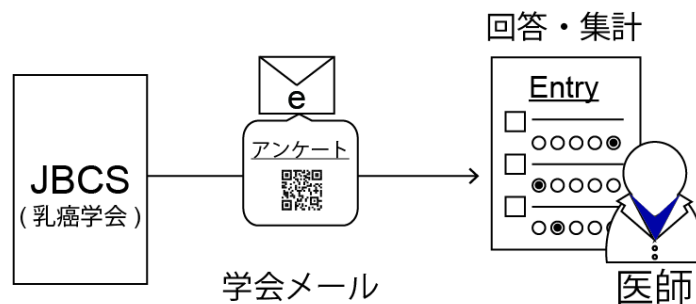


図5 医師へのアンケート方法

医師向けのアンケートは 20 項目から構成され、そのうち 12 項目は医師の背景に特化した質問であった (図2)。これらの質問は 5 つのグループに分類され、高い相関を持つもののみを PCA の対象とした (図6)。ただし、地理データに関しては、PCA を用いて緯度と経度を「位置 (経度)」という一つの指標に統合した。さらに詳細な検討のため、医師の専門分野によって情報支援のレベルが異なるかどうかを確認するための多重比較が検討し、この点については後続のセクションで詳述する。

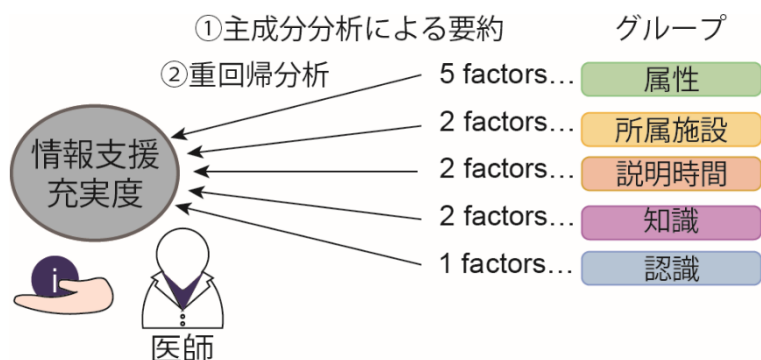


図6 医師アンケートにおける主成分分析後の重回帰分析のフローチャート

2.3. 患者と医師の意識調査

医療費に関する情報支援を評価するため、患者と医師の双方に対し、提供される医療費等の情報量とアクセスの機会に焦点を当てた共通の質問を2つ行った。

質問1 『費用負担について十分な説明を受けていますか（説明をしていますか）？』

質問2 『医療費に関する質問をできる機会がありますか（機会をあたえていますか）？』

いずれの質問も。回答は5点リッカート尺度（1 = 全くそう思わない、2 = ややそう思う、3 = そう思う、4 = まあそう思う、5 = 強くそう思う）で収集し、患者、医師、および患者におけるFTの各毒性グレードの間でこれらの指標にどのような違いがあるかを評価した。

これらの質問は医療費に関する情報支援のレベルと関連しており、一つの指標に統合できると考えられたため、両質問から第一主成分（PC1）を抽出し、これを情報支援レベル（Information Support Level; ISL）と定義した（図7・表1）。ISLの地域差を探るため、患者と医師の両方に対する都道府県別平均を算出し、地理的なレイアウト上のヒートマップとして表現した。さらに、異なる都道府県間でのISLの潜在的な差異を特定するために、多重比較を実施した。



図7・表1 患者の情報支援に関する主成分分析図と表

2.4. スケール変換、パラメータ設定、データ分類

選択肢に含まれる順位尺度は連続値に変換し、選択肢に含まれる名義尺度は独立した尺度に変換された。患者の居住地と医師の事務所の位置の経度と緯度は、国土地理院のウェブサイト^[21]から抽出した。人口データは総務省統計局のウェブサイト^[22]から抽出された。各グループに対して主成分分析（PCA）を行い、複数の因子に分類した。主成分（Principal Component; PC）は固有値（Eigenvalue; EV）>1、また累積寄与率（Cumulative Contribution Ratio; CCR）>80%を目標に導出し、臨床的に意義付けの可能な成分に限定した。全体の解析イメージ図を示す（図8）。

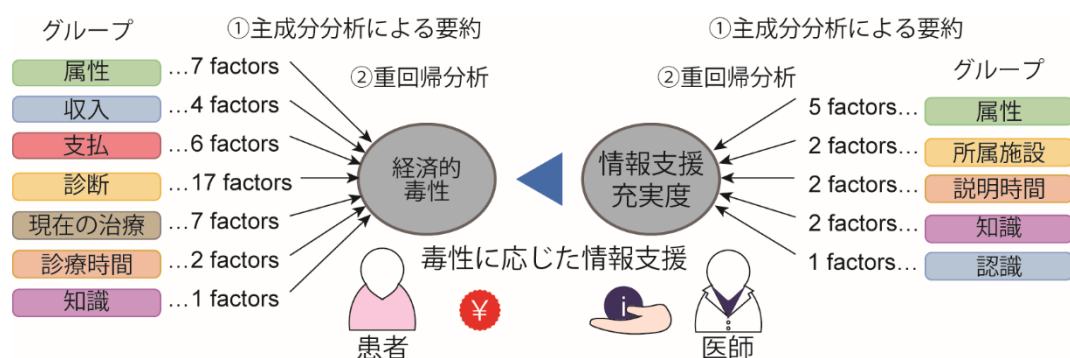


図8 患者の経済毒性と医師による情報支援レベル双方について全体の分析イメージ図

2.5. 経済毒性（Financial toxicity; FT）の定義

患者の FT を定量化するために、包括的 FT スコア（Comprehensive Score for Financial Toxicity; COST）の日本語版を利用した^{[23][24]}。COST 尺度は開発者の定義によると、0 から 44 の範囲の連続変数を生成する。小さい値はより高い FT を意味するため^{[23]-[28]}、FT の計算式は以下の通り設定した（式 1）。FT は開発者の定義に基づき以下の 4 つの毒性グレード（※）に分類した^[27]。

$$\begin{aligned}
 \text{(式 1) } FT = 44 - \text{COST} \quad (\text{※}) \quad & G0 : \text{FT なし} && (\text{COST} \geq 26) \\
 & G1 : \text{軽度の FT あり} && (14 \leq \text{COST} < 26) \\
 & G2 : \text{中等度の FT あり} && (0 < \text{COST} < 14) \\
 & G3 : \text{重度の FT あり} && (\text{COST} = 0)
 \end{aligned}$$

2.6. データ分析

すべての解析に JMP® 17.0.0（SAS Institute Japan）を使用した。ISL に関する患者と医師の態度の違い、および FT グレードに基づく患者の態度の変化を評価するために、Wilcoxon 順位和検定を用い、都道府県別の ISL に関する患者と医師の多重比較、および医師の専門分野別の比較には Kruskal-Wallis 検定を利用した。有意差が見られた場合、Steel-Dwass 検定を用いて Pairwise 比較を実施した。FT および医師の ISL に関連する因子を連続量に変換し、それを因子化するために、最小二乗法を用いた多変量重回帰分析を行った。すべての分析において、 $p < 0.05$ を統計学的に有意と見なした。

3. 結果

3.1. アンケート収集結果

患者からは 1,558 件、医師からは 825 件の回答が得られた (図 9)。

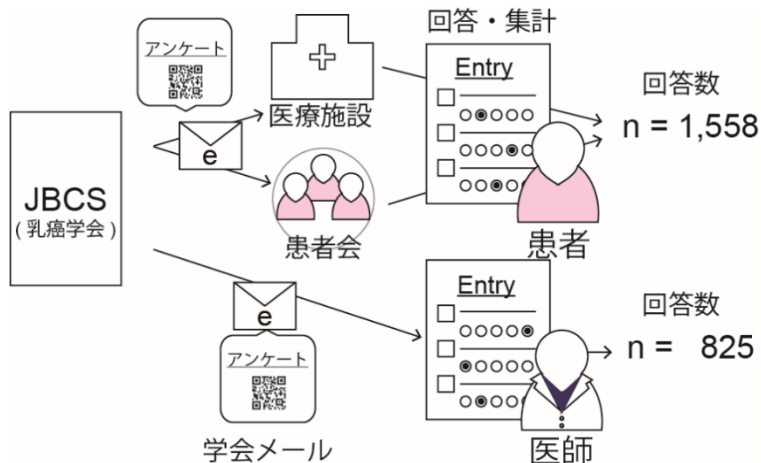


図 9 患者と医師から得られたアンケート回答数

3.2. 患者背景因子の PCA による分類と要約

患者の背景因子はアンケート項目に基づき 6 つのグループに分類され、各グループに対して PCA を実施し、主成分 (PC) とサブグループを特定した。これにより、PCA 対象外の 2 項目を含む 20 の背景因子が同定された (補足ファイル [29])。グループ A は患者属性に関連する 7 項目で構成され、3 つのサブグループ (年齢、訪問、位置) と 1 つの基本項目 (位置[人口]) に分類した。PC は「年齢」「居住地 (経度)」「アクセスの負担」であった (図 10・表 2)。

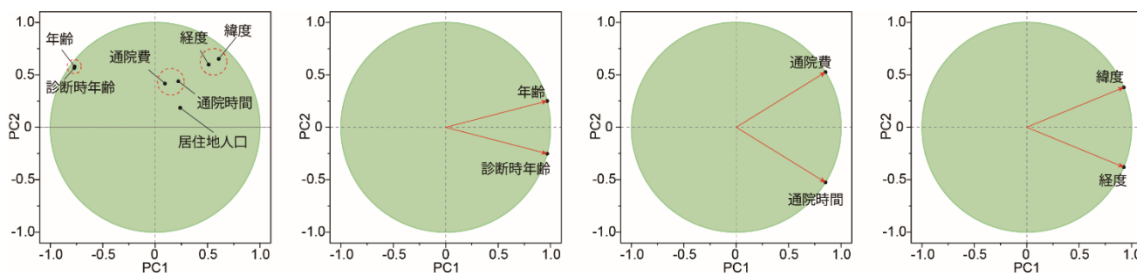


図 10 患者属性に関する主成分分析図

| グループ | 項目 | 主成分分析 | | |
|------|-------------|---------|------|------|
| | | 選抜項目 | EV* | CCR* |
| 属性 | 年齢(現在) | 年齢 | 1.87 | 93.7 |
| 属性 | 年齢(診断時) | 居住地(経度) | 1.71 | 85.6 |
| 属性 | 居住地都道府県 | 通院の負担 | 1.45 | 72.5 |
| 属性 | 居住都道府県人口密度 | 居住地の都会度 | - | - |
| 属性 | 居住地都道府県庁の経度 | - | - | - |
| 属性 | 居住地都道府県庁の緯度 | - | - | - |
| 属性 | 医療機関への通院費 | - | - | - |
| 属性 | 医療機関への通院時間 | - | - | - |

* EV Eigenvalue (固有値), CCR Cumulative contribution ratio (累積寄与率)

表 2 患者属性に関する主成分分析表

グループ B は収入関連の 4 項目で「収入」と「家族のサポート」が PC となった (図 11・表 3)。



図 11・表 3 患者属性に関する主成分分析図と表

グループ C は支払い (医療費と保険関連) に関する 6 項目で、「直近の支払い」「自己負担 (割合)」「自己負担 (合計)」が PC となった (図 12・表 4)。

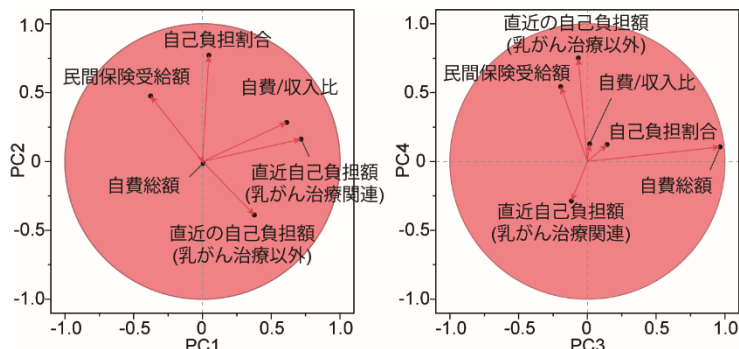


図 12 支払 (医療費と保険関連) に関する主成分分析図

| グループ | 項目 | 主成分分析 | | |
|------|--------------------|-----------|------|------|
| | | 選抜項目 | EV* | CCR* |
| 支払 | 自己負担割合 | 直近の支払い | 1.18 | 19.6 |
| 支払 | 民間保険受給額 | 自己負担 (割合) | 1.08 | 37.6 |
| 支払 | 自費総額 | 自己負担 (合計) | 1.01 | 54.4 |
| 支払 | 直近の自己負担額 (乳がん治療関連) | - | - | - |
| 支払 | 直近の自己負担額 (乳がん治療以外) | - | - | - |
| 支払 | 自費/収入比 | - | - | - |

* EV Eigenvalue (固有値), CCR Cumulative contribution ratio (累積寄与率)

表 4 支払 (医療費と保険関連) に関する主成分分析表

グループ D は診断・治療関連の 17 項目で、4 つのサブグループ (ステージ、乳房手術、放射線治療、オンコプラスチック手術) とその他の項目が生じ、PC は「ステージ」「乳房手術」「乳房再建術」「放射線治療」「介入した診療科数」とされた (図 13・表 5)。

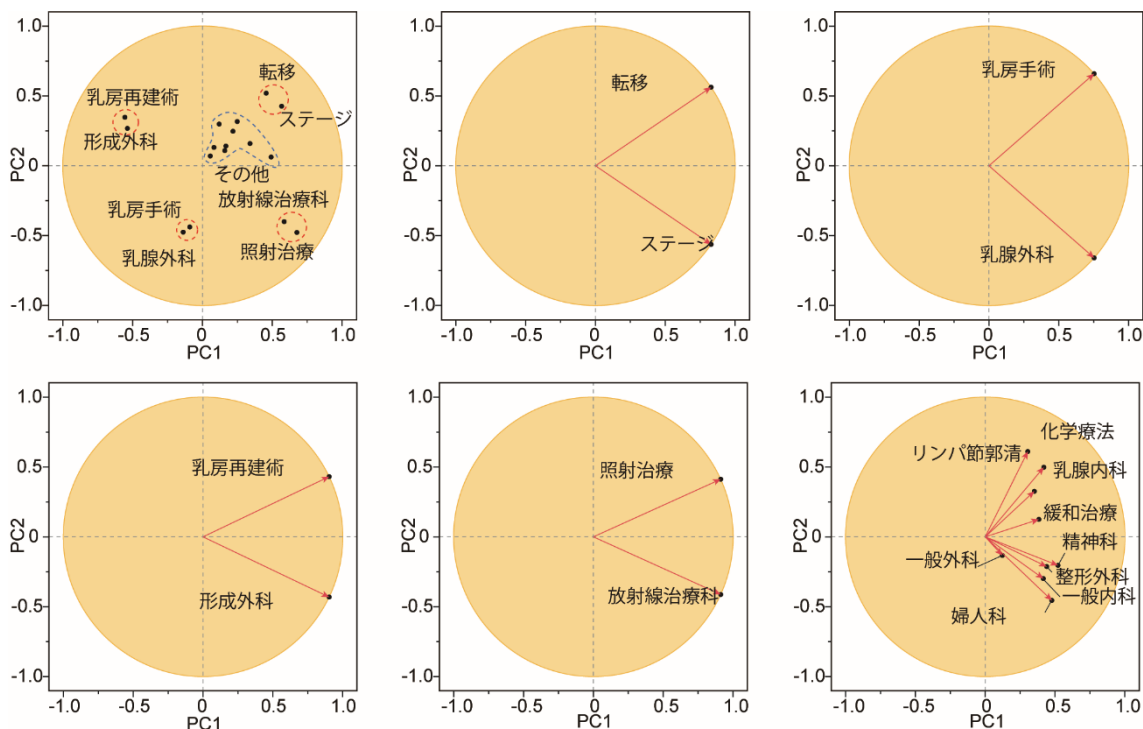


図 13 診断・治療に関する主成分分析図

| グループ | 項目 | 主成分分析 | |
|-------|-------------|----------|-----------|
| | | 選抜項目 | EV* CCR* |
| 診断・治療 | 診断時ステージ(病期) | ステージ | 1.37 68.4 |
| 診断・治療 | 転移の有無 | 乳房手術 | 1.13 56.6 |
| 診断・治療 | 乳房手術歴 | 乳房再建術 | 1.63 81.4 |
| 診断・治療 | 乳房再検術の有無 | 放射線治療 | 1.66 83.0 |
| 診断・治療 | リンパ節郭清 | 介入した診療科数 | 1.42 15.8 |
| 診断・治療 | 化学療法 | - | - - |
| 診断・治療 | 放射線治療 | - | - - |
| 診断・治療 | 乳腺外科による診療 | - | - - |
| 診断・治療 | 乳腺内科による診療 | - | - - |
| 診断・治療 | 放射線治療科による診療 | - | - - |
| 診断・治療 | 一般外科による診療 | - | - - |
| 診断・治療 | 一般内科による診療 | - | - - |
| 診断・治療 | 精神科による診療 | - | - - |
| 診断・治療 | 緩和治療科による診療 | - | - - |
| 診断・治療 | 婦人科による診療 | - | - - |
| 診断・治療 | 形成外科による診療 | - | - - |
| 診断・治療 | 整形外科による診療 | - | - - |

* EV Eigenvalue (固有値), CCR Cumulative contribution ratio (累積寄与率)

表 5 診断・治療に関する主成分分析表

グループ E は現在の診断と治療状況に関連する 7 項目で、「内分泌療法」「化学療法」「訪問頻度」が PC となった (図 14・表 6)。

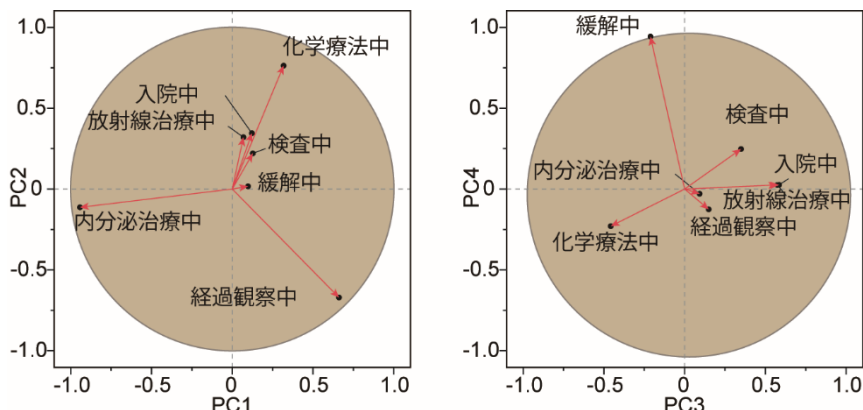


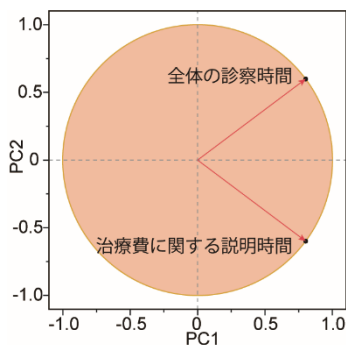
図 14 現在の診断と治療状況に関する主成分分析図

| グループ | 項目 | 主成分分析 | |
|-------|--------|-------|-----------|
| | | 選抜項目 | EV* CCR* |
| 現在の状況 | 検査中 | 内分泌治療 | 1.47 21.0 |
| 現在の状況 | 入院中 | 化学療法 | 1.31 39.8 |
| 現在の状況 | 化学療法中 | 通院頻度 | 1.08 55.1 |
| 現在の状況 | 放射線治療中 | - | - - |
| 現在の状況 | 内分泌治療留 | - | - - |
| 現在の状況 | 経過観察中 | - | - - |
| 現在の状況 | 緩和中 | - | - - |

* EV Eigenvalue (固有値), CCR Cumulative contribution ratio (累積寄与率)

表 6 現在の診断と治療状況に関する主成分分析表

最後に、グループ F の 2 項目（診察時間と治療費に関する説明時間）から、「診察時間」と「治療費関連説明量」が PC となった（図 15・表 7）。



| グループ | 項目 | 主成分分析 | |
|------|-------------|----------|------------|
| | | 選抜項目 | EV* CCR* |
| time | 全体の診察時間 | 診察時間 | 1.28 64.2 |
| time | 治療費に関する説明時間 | 治療費関連説明量 | 0.72 100.0 |

* EV Eigenvalue (固有値), CCR Cumulative contribution ratio (累積寄与率)

図 15・表 7 診察時間と治療費関連説明時間に関する主成分分析図と表

3.3. COST の分布と FT のグレーディング

COST の平均値は 21.45 (標準偏差 8.81、n=1557、欠損 n=1)。平均の標準誤差は 0.223 (95%CI: 21.01-21.89)。COST の値に基づき、患者は FT の 4 つのグレードに分類された—グレード 0 (n=583)、グレード 1 (n=711)、グレード 2 (n=306)、グレード 3 (n=3) (図 16A)。

3.4. FT に影響する因子

重要度順に、「最近の支払い」($\beta=0.18$, $p<0.0001$)、「ステージ」($\beta=0.11$, $p<0.0001$)、「介入した診療科数」($\beta=0.11$, $p<0.0001$)、「自己負担(割合)」($\beta=0.07$, $p=0.004$)、そして「化学療法」($\beta=0.07$, $p=0.016$)が FT にプラスの影響を与えている一方、「収入」($\beta=-0.36$, $p<0.0001$)、「年齢」($\beta=-0.11$, $p<0.0001$)、そして「家族のサポート」($\beta=-0.08$, $p=0.0001$)が FT にマイナスの影響を与えていることが多変量回帰分析によって明らかになった(図 16B、表 8)。

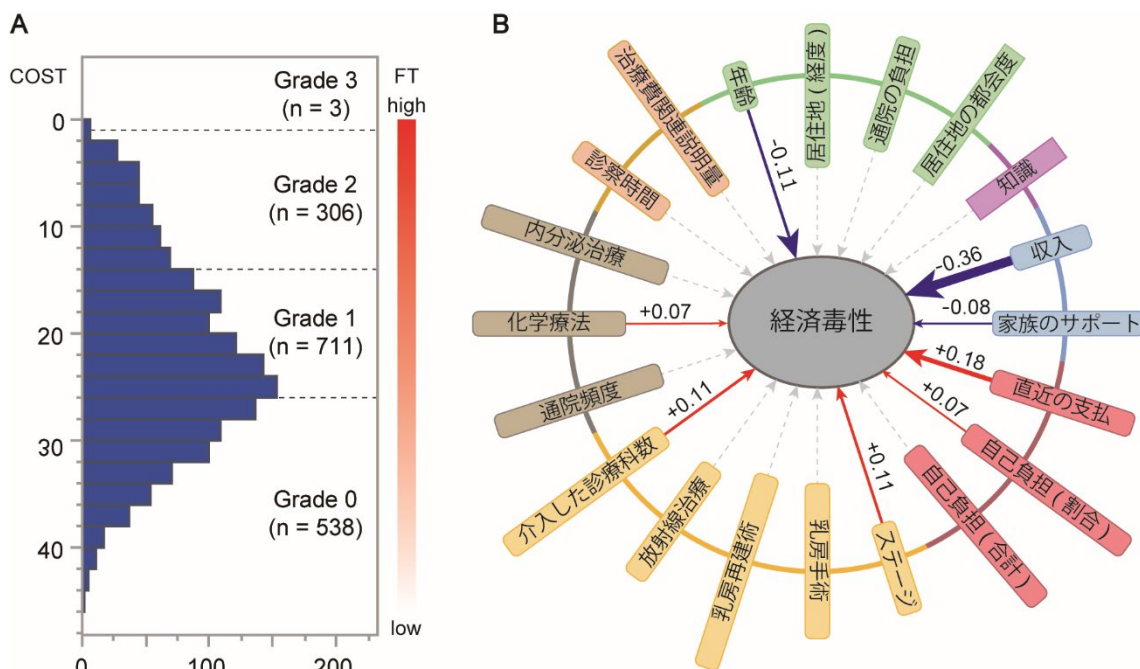


図 16 A : COST 分布と経済毒性のグレード図 B : 経済毒性に影響する因子の分析

| explanatory variable | estimated | lower 95% | upper 95% | β^{**} | p-value | VIF † |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------|------------------|
| intercept | 23.13 | 21.96 | 24.30 | 0.00 | <.0001 | . |
| 年齢 | -0.75 | -1.06 | -0.44 | -0.11 | <.0001 | 1.07 |
| 居住地(経度) | -0.07 | -0.39 | 0.26 | -0.01 | 0.681 | 1.06 |
| 通院の負担 | 0.19 | -0.16 | 0.53 | 0.03 | 0.290 | 1.05 |
| 居住地の都会度 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.03 | 0.190 | 1.12 |
| 収入 | -2.01 | -2.29 | -1.74 | -0.36 | <.0001 | 1.15 |
| 家族のサポート | -0.61 | -0.97 | -0.25 | -0.08 | 0.001 | 1.02 |
| 直近の支払い | 1.46 | 1.06 | 1.85 | 0.18 | <.0001 | 1.14 |
| 自己負担(割合) | 0.60 | 0.19 | 1.01 | 0.07 | 0.004 | 1.09 |
| 自己負担(合計) | 0.14 | -0.36 | 0.64 | 0.01 | 0.583 | 1.02 |
| ステージ | 0.83 | 0.42 | 1.25 | 0.11 | <.0001 | 1.41 |
| 乳房手術 | 0.09 | -0.35 | 0.54 | 0.01 | 0.689 | 1.20 |
| 乳房再建術 | -0.25 | -0.59 | 0.09 | -0.04 | 0.153 | 1.19 |
| 放射線治療 | -0.06 | -0.41 | 0.29 | -0.01 | 0.741 | 1.24 |
| 介入した診療科数 | 0.82 | 0.45 | 1.20 | 0.11 | <.0001 | 1.20 |
| 内分泌治療 | 0.09 | -0.25 | 0.43 | 0.01 | 0.607 | 1.07 |
| 化学療法 | 0.51 | 0.10 | 0.92 | 0.07 | 0.016 | 1.35 |
| 通院頻度 | 0.10 | -0.31 | 0.52 | 0.01 | 0.632 | 1.07 |
| 診察時間 | 0.04 | -0.32 | 0.41 | 0.01 | 0.824 | 1.05 |
| 治療費関連説明量 | -0.05 | -0.54 | 0.44 | -0.01 | 0.830 | 1.02 |
| 知識 | -0.20 | -0.60 | 0.19 | -0.02 | 0.310 | 1.05 |

* 偏回帰係数を記した。
 ** 標準化偏回帰係数を記した。
 † 分散拡大係数を記した。

表 8 経済毒性についての重回帰分析結果の表

3.5. 患者と医師の態度

医療費に関する情報支援の評価では、患者と医師の間で 5 点リッカート尺度における反応パターンの明確な逆転が見られた。患者で最も多かった回答は「全くない」である一方、医師では「やや同意する」が最も多く、認識された情報支援においてギャップがあることが示された。両グループ間で有意な差が観察された ($p < 0.0001$) (図 17A)。医療費と経済的負担に関する質問の機会に関しても、同様の反応パターンと有意な差 ($p < 0.0001$) が見られた (図 17B)。

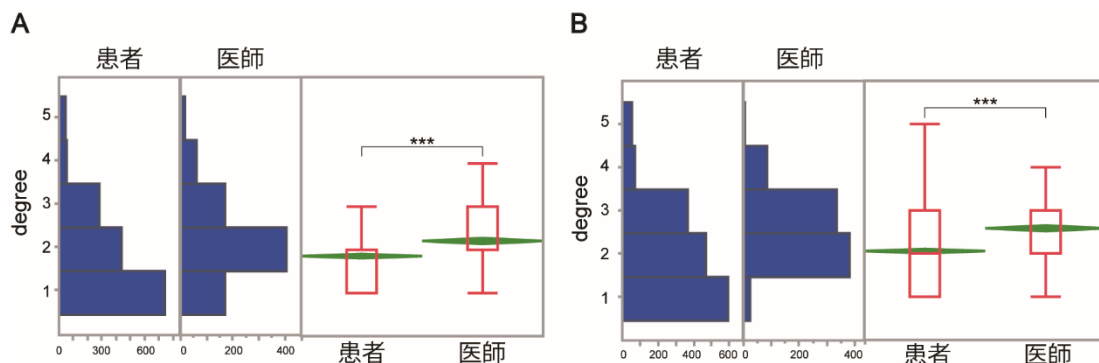


図 17 医療費の説明頻度や質問機会に関する患者と医師の認識の結果

A は説明の頻度について、B は質問機会についての回答を示してある。

3.6. FT と情報支援に関する調査結果

FT グレードごとに医療費に関する説明や質問の機会の頻度に差が観察された。しかし、より高い FT グレードが医療費に関するより良い情報支援に対応しているわけではなかった。グレード 3 を除くすべてのグレードで、最も多い回答は「全くない」または「やや同意する」に傾いていた。FT グレードが上がるにつれて情報支援の減少がわずかに見られた (図 3D、E)。グレードごとに説明の頻度 ($p = 0.0366$) (図 18A) と質問の機会 ($p = 0.0009$) (図 3E) において有意な差が明らかになった。Pairwise 比較では、説明の頻度に関してグレード 2 と 0 の間 ($p = 0.0448$) (図 18B)、質問の機会に関してグレード 1 と 0 ($p = 0.0017$)、グレード 2 と 0 ($p = 0.0109$) の間に有意な差が見られた (図 18B)。

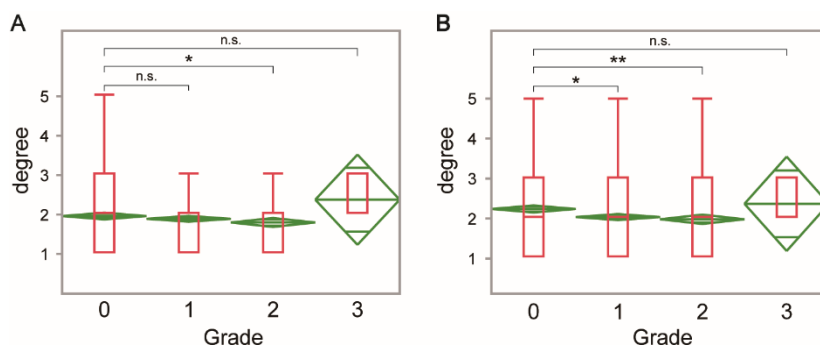


図 18 医療費の説明頻度や質問機会に関する患者の経済毒性グレード毎の認識の結果

A は説明の頻度について、B は質問機会についての回答を示してある。

3.7. ISLの地域的偏り

各患者の情報支援レベル（ISL）は日本全国としてまとめた場合、非正規分布であった。患者のISLについて地域による偏りの有無を地図上のヒートマップとして示した（図19A）。特定の地域・地方による偏りは明らかではなかったが、都道府県別のISLの分布にはばらつきが観察された。都道府県間のISLの多重比較では、有意差が検出された（ $p < 0.0001$ ）Pairwise比較では、長崎と大阪（ $p < 0.001$ ）、埼玉（ $p = 0.019$ ）、福岡（ $p = 0.023$ ）、奈良（ $p = 0.039$ ）の間の組合せでのみISLに差があることが示された（図19B）。

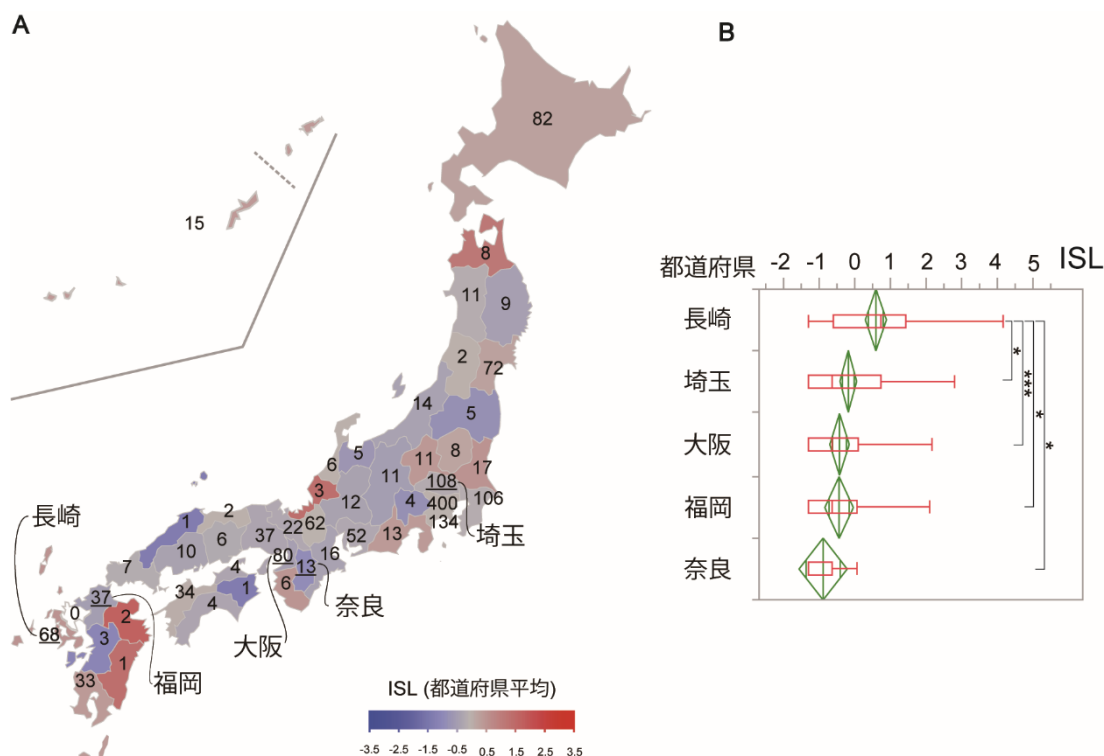


図19 情報支援レベル（ISL）の地域差を示した図

Aは都道府県別平均値と回答者数、BはPairwiseで有意差のあった都道府県間の組み合わせにおける比較を示している。

3.8. 医師の背景要因のPCAおよび相関分析による分類と要約

患者の場合と同様に緯度と経度にPCAを実施し、「位置(経度)」として要約した（図10）。その他の基本項目はPCAを行わず、情報支援レベルに関する多変量回帰分析を実施したところ、年齢と卒業後の年数で分散拡大係数が3以上となることが観察された（表9）。多重共線性を避けるため、因子間で相関分析を行い、年齢、卒業後の年数、および性別（男性）間に相関（それぞれ $r = 0.85$ 、 0.44 ）が見られた（図20A）。これらの因子にPCAが実施され、「年齢」、「性別（男性）」、「経験」としてPCが指定され、交絡要因が除外された（図20B、C）。他の因子間の相関係数は $|r| < 0.25$ であった。最終的に、12の背景要因が選択され、PCAが実施されなかった4つのPCと8つの基本項目が含まれている（表10）。

| explanatory variable | estimated value* | lower 95% | upper 95% | β^{**} | p-value (Prob> t) | VIF† |
|----------------------|------------------|-----------|-----------|--------------|--------------------|------|
| intercept | -3.14 | -3.59 | -2.68 | 0.00 | <.0001 | . |
| 年齢 | -0.01 | -0.13 | 0.11 | -0.01 | 0.898 | 3.81 |
| 性別(男性) | -0.20 | -0.35 | -0.05 | -0.08 | 0.009 | 1.29 |
| 卒業後年数 | 0.01 | -0.10 | 0.12 | 0.01 | 0.854 | 3.70 |
| 居住地(経度) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.05 | 0.084 | 1.07 |
| 居住地人口密度 | 0.00 | -0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.999 | 1.14 |
| 診療施設規模 | 0.01 | -0.04 | 0.05 | 0.01 | 0.688 | 1.07 |
| 担当患者数 | -0.02 | -0.07 | 0.04 | -0.01 | 0.613 | 1.11 |
| 診療時間 | 0.45 | 0.34 | 0.56 | 0.23 | <.0001 | 1.07 |
| 治療費関連の説明時間 | 0.44 | 0.36 | 0.52 | 0.33 | <.0001 | 1.20 |
| 知識 | 0.10 | -0.03 | 0.23 | 0.04 | 0.130 | 1.05 |
| 診療費関連の学習機会 | 0.36 | 0.30 | 0.43 | 0.32 | <.0001 | 1.09 |
| 診療費についての認識 | 0.01 | -0.04 | 0.06 | 0.01 | 0.679 | 1.04 |

* 偏回帰係数を記した。
 ** 標準化偏回帰係数を記した。
 † 分散拡大係数を記した。

表9 医師の情報支援レベルについての重回帰分析結果の表

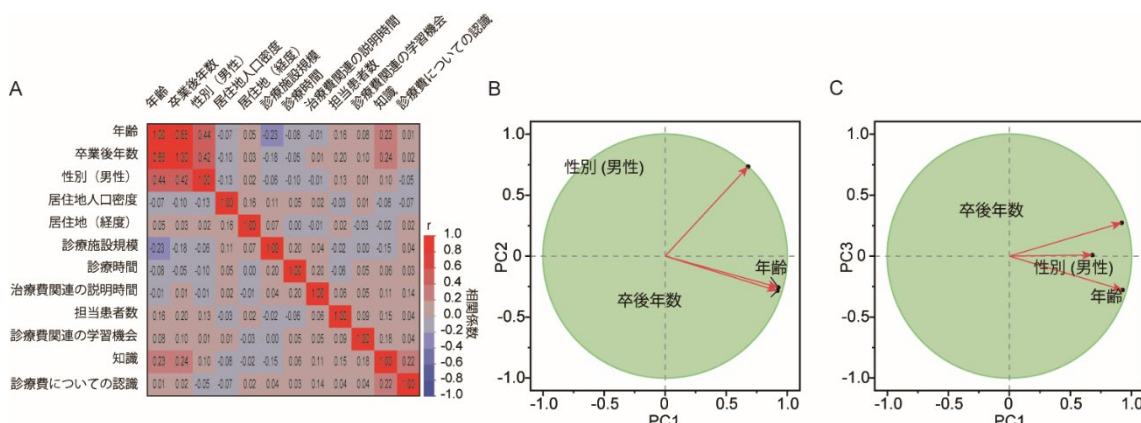


図20 医師の背景因子についての図

Aは因子間の相関分析結果、B、Cは相関係数の高い因子についてPCAを行った結果を示している。

| グループ | 項目 | 主成分分析 | |
|------|------------|------------|------------|
| | | 選抜項目 | EV* CCR* |
| 属性 | 年齢 | 年齢 | 2.16 72.1 |
| 属性 | 性別(男性) | 性別(男性) | 0.69 94.9 |
| 属性 | 専門分野 | - | - |
| 属性 | 卒業後年数 | 経験値 | 0.15 100.0 |
| 属性 | 勤務地の都道府県 | - | - |
| 属性 | 勤務地の人口密度 | 居住地人口密度 | - |
| 属性 | 都道府県庁の緯度 | 居住地(経度) | 1.72 85.9 |
| 属性 | 都道府県庁の経度 | - | - |
| 施設 | 診療施設規模 | 診療施設規模 | - |
| 施設 | 担当患者数 | 担当患者数 | - |
| 時間 | 診療時間 | 診療時間 | - |
| 時間 | 治療費関連の説明時間 | 治療費関連の説明時間 | - |
| 知識 | 治療費についての知識 | 知識 | - |
| 知識 | 診療費関連の学習機会 | 診療費関連の学習機会 | - |
| 認識 | 診療費についての認識 | 診療費についての認識 | - |
| 情報支援 | 治療費についての説明 | ISL** | 1.32 65.8 |
| 情報支援 | 治療費関連の質問機会 | - | - |

EV Eigenvalue, CCR Cumulative contribution ratio, ** ISL information support level

表10 医師背景のうち交絡を認めた因子についての主成分分析表 (PCA前)

3.9. 医師の ISL に影響を与える要因

多変量回帰分析により、重要度の順に、知識 ($\beta=0.33$, $p<0.0001$)、必要性の認識 ($\beta=0.32$, $p<0.0001$)、および費用に関する相談時間 ($\beta=0.23$, $p<0.0001$) が ISL にプラスの影響を与えることが明らかになった。しかし、「性別 (男性)」 ($\beta=-0.06$, $p=0.029$) は ISL にマイナスの影響を与えた (図 21A、表 11)。

3.10. 医師の専門分野別の ISL の比較

専門分野別の ISL の分布に関する Kruskal-Wallis 検定により有意な差が見られた ($p<0.0022$)。しかし、Steel-Dwass 検定による Pairwise 比較では、いずれの組み合わせにおいても統計学的に有意な差は見られなかった (図 21B)。

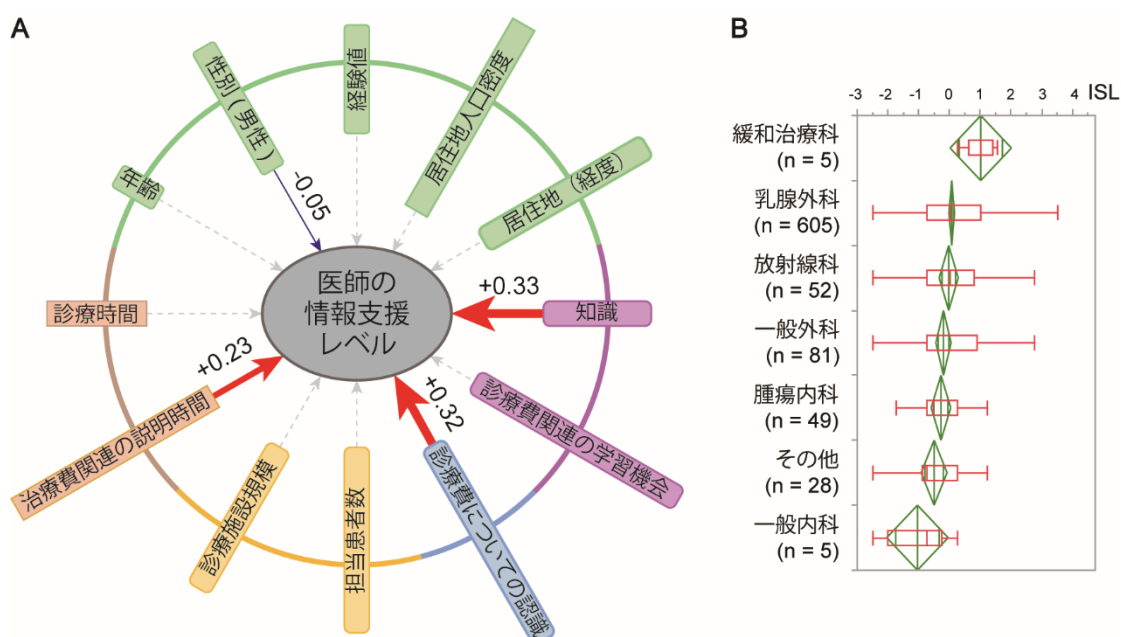


図 21 医師の情報支援レベルに影響する因子の検討図

A は各因子による重回帰分析図、B は専門科ごとの情報支援レベルの比較を示している。

| explanatory variable | estimated value* | lower 95% | upper 95% | β^{**} | p-value (Prob> t) | VIF† |
|----------------------|------------------|-----------|-----------|--------------|--------------------|------|
| intercept | -3.26 | -3.65 | -2.86 | 0.00 | <.0001 | . |
| 年齢 | -0.04 | -0.09 | 0.00 | -0.05 | 0.071 | 1.14 |
| 性別(男性) | -0.09 | -0.16 | -0.01 | -0.06 | 0.029 | 1.03 |
| 卒業後年数 | 0.01 | -0.15 | 0.17 | 0.00 | 0.890 | 1.02 |
| 居住地(経度) | 0.01 | -0.04 | 0.06 | 0.01 | 0.679 | 1.04 |
| 居住地人口密度 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.05 | 0.084 | 1.07 |
| 診療施設規模 | 0.00 | -0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.999 | 1.14 |
| 担当患者数 | 0.01 | -0.04 | 0.05 | 0.01 | 0.688 | 1.07 |
| 診療時間 | -0.02 | -0.07 | 0.04 | -0.01 | 0.613 | 1.11 |
| 治療費関連の説明時間 | 0.45 | 0.34 | 0.56 | 0.23 | <.0001 | 1.07 |
| 知識 | 0.44 | 0.36 | 0.52 | 0.33 | <.0001 | 1.20 |
| 診療費関連の学習機会 | 0.10 | -0.03 | 0.23 | 0.04 | 0.130 | 1.05 |
| 診療費についての認識 | 0.36 | 0.30 | 0.43 | 0.32 | <.0001 | 1.09 |

* 偏回帰係数を記した。
 ** 標準化偏回帰係数を記した。
 † 分散拡大係数を記した。

表 11 医師の情報支援レベルについての重回帰分析結果の表 (PCA 後)

4. 考察

本研究は、日本の乳がん患者が直面する経済的負担を調査した。その結果、直近の支払いが患者の経済的負担に大きな影響を与えることが明らかになった。また、がんの進行段階が進むほど、抗がん療法などの多専門的介入が必要になる患者の経済毒性が高くなる傾向が見られた。この傾向は、若い患者や低所得の患者にも観察された。特に注目すべきは、患者と医師の間で情報支援の認識に差異があることが特定されたことである。患者はしばしば、医師が認識するよりも少ないサポートを受けていると感じていた（図 22A）。さらに、経済的負担が増すにつれて、患者の情報支援に対する認識が減少する傾向があることが示唆された（図 22B）。

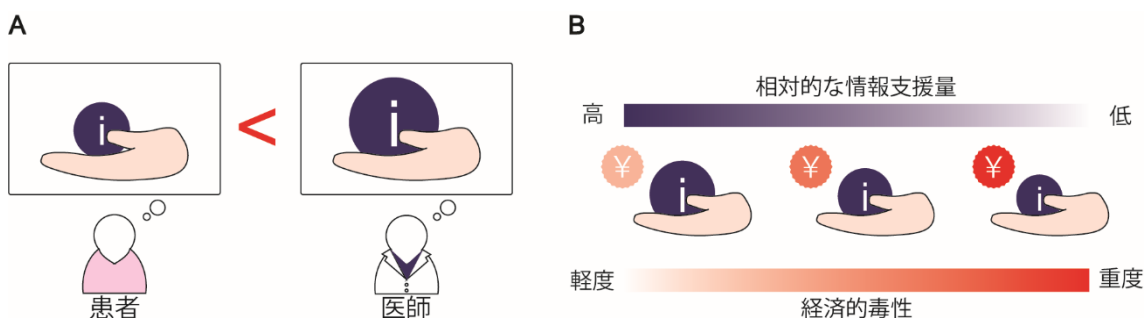


図 22 患者と医師による情報支援の受け止めと経済毒性と情報支援量の関係の図。

A は医師が考えるほど患者は情報を受け取っていないと感じている様子、B は経済毒性が高まる一方で、情報支援量が相対的に減少することを示している。

医師の情報支援の充実性に影響を及ぼす因子として、知識、診療費情報の必要性の認識、費用に関する相談時間が重要な要因であることが明らかになった。これは、情報支援の重要性を認識し、医療費に関する包括的な理解を持つ医師が、より充実した費用関連のサポートを提供できる可能性を示唆している。また、患者が感じる情報支援レベルには地域差があり、一部の都道府県の患者は他の都道府県の患者よりも多くのサポートを受けていると感じていた。しかし、本研究は特定の施設に焦点を当てており、施設特有の違いが地理的要因よりも大きな影響を及ぼす可能性があることに注意する必要がある。医師の情報支援レベルについて、専門分野間で全体的に有意な差が見られたが、後続の Pairwise 比較では特定の専門分野の組み合わせで統計学的に有意な差が見られなかった。これらの結果は、サンプルサイズの偏りや小規模なサンプルサイズグループを含む多重比較に関連する潜在的なバイアスのために慎重に解釈されるべきである^[30]。

本研究では、大規模なデータセットをコアコンポーネントに縮小するのに有用な手法である PCA を効果的に使用した^[31]。多数のアンケート項目を要約することにより、乳がん患者が直面する経済的負担についての明確な洞察を提供することが可能となった。本研究の限界としては、患者と医師の態度に関するアンケート項目が客観的な尺度としてのみ使用できないことがあげられる。また、調査された医師と患者の直接のペアで比較が行われず、

関連する要因の調査が同一サンプル内の関連性の検討に限られていた。

日本は国民が保険料を支払い、医療費の一部をカバーする国民皆保険制度がある。患者は通常、費用の最大 30%を支払う。また、高額医療費制度では、被保険者の年齢と所得レベルに基づいた月額最大金額を提供し、70 歳未満で年収約 1,160 万円以上の人の最高額は約 252,600 円である^[32]。しかし、申請から給付の受取までに 3 か月のタイムラグがあり、特に貯蓄が限られた若い世代の家計には大きな経済的負担となる。さらに、一部の医師は高額医療費制度に詳しくない場合があり、患者は申請プロセス中に情報支援が不足している可能性がある。

今後の方向性として、医療費に関する患者へのサポートを強化するために病院システムを改善し、医療従事者間の協力を促進することが重要である。これにより、既存のリソースと専門知識を活用し、医師、医療ソーシャルワーカー、看護師、その他の医療専門家間の協力を強化することで、患者の経済的負担を軽減することができる^[33]。非営利団体や患者団体との意見交換や社会的認識イニシアチブにも参加することが重要である。また、個々のケースに合わせた治療後の経済的負担に関するシームレスな情報支援の提供が不可欠である^[34]。たとえば、医師や病院スタッフを通じて患者に最大費用適用証明書システムに関する情報を提供することで、3 か月の返済遅延を防ぐことができる。その他一部の研究では、「ChemoCalc™」のような、薬剤費用を計算し、患者に経済的情報支援を提供するツールの効果を評価している^[35]。また、患者の支払い意思^[36]やバイオシミラーの患者の自己負担への経済的影響^[37]を調査した報告もある。医師は提案された治療が患者に課す経済的負担の程度を認識し、よりパーソナライズされた治療オプションを検討する必要がある。

5. 結語

本研究は、日本の乳がん患者における経済毒性 (FT) の問題を浮き彫りにし、直近の支払いに関連する経済的負担への対応の重要性を強調した。医療費に関する情報支援の改善と、提案された治療の経済的影響について医師が深く理解する必要がある。これらの課題に対処するため、医療機関および個人レベルでの取り組みが不可欠である。乳がん患者の FT を軽減するためには、様々な専門職種間での協力が重要であり、既存のリソースと専門知識を最適化し、個別化された情報支援を提供することが必要である。

6. 謝辞

本研究は、2019 年度乳癌学会班研究分担研究テーマとして行われました。班員の先生方に心よりお礼を申し上げます。また原著論文の revision に際し本研究の分析方法を review いただいた元慶応義塾大学大学院客員教授 (現統計数理研究所 リスク解析戦略研究センター 客員教授) 高橋武則先生にお礼を申し上げます。なお、原著論文は 2023 年 6 月 13 日に日本乳癌学会学術誌である *Breast Cancer* (査読付) にオープンアクセスライセンスの下で Springer 社より公開されています^[37]。

参考文献

- [1] Harbeck, N. & Gnant, M. Breast cancer. *Lancet* 389, 1134-1150, doi:10.1016/s01406736(16)31891-8 (2017).
- [2] がん腫別統計情報 乳房
https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/cancer/14_breast.html
- [3] Ohuchi, N. et al. Sensitivity and specificity of mammography and adjunctive ultrasonography to screen for breast cancer in the Japan Strategic Anti-cancer Randomized Trial (J-START): a randomised controlled trial. *Lancet* 387, 341-348, doi:10.1016/s0140-6736(15)00774-6 (2016).
- [4] McDonald, E. S., Clark, A. S., Tchou, J., Zhang, P. & Freedman, G. M. Clinical Diagnosis and Management of Breast Cancer. *J Nucl Med* 57 Suppl 1, 9s-16s, doi:10.2967/jnumed.115.157834 (2016).
- [5] Gabriel, C. A. & Domchek, S. M. Breast cancer in young women. *Breast Cancer Research* 12, 212, doi:10.1186/bcr2647 (2010).
- [6] Miller, K. D. et al. Cancer statistics for adolescents and young adults, 2020. *CA Cancer J Clin* 70, 443-459, doi:10.3322/caac.21637 (2020).
- [7] Kim, J. et al. Association between financial burden and adjuvant hormonal therapy adherence and persistent use for privately insured women aged 18-64 years in BCBS of Texas. *Breast Cancer Res Treat* 169, 573-586, doi:10.1007/s10549-018-4704-3 (2018).
- [8] Offodile, A. C., 2nd et al. Financial Toxicity Following Surgical Treatment for Breast Cancer: A Cross-sectional Pilot Study. *Ann Surg Oncol* 28, 2451-2462, doi:10.1245/s10434-020-09216-9 (2021).
- [9] Dean, L. T. et al. Patient recommendations for reducing long-lasting economic burden after breast cancer. *Cancer* 125, 1929-1940, doi:10.1002/cncr.32012 (2019).
- [10] Thom, B., Benedict, C., Friedman, D. N. & Kelvin, J. F. The intersection of financial toxicity and family building in young adult cancer survivors. *Cancer* 124, 3284-3289, doi:10.1002/cncr.31588 (2018).
- [11] Meernik, C. et al. Fertility Preservation and Financial Hardship among Adolescent and Young Adult Women with Cancer. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 31, 1043-1051, doi:10.1158/1055-9965.Epi-21-1305 (2022).
- [12] Kamal, K. M. et al. A Systematic Review of the Effect of Cancer Treatment on Work Productivity of Patients and Caregivers. *J Manag Care Spec Pharm* 23, 136-162, doi:10.18553/jmcp.2017.23.2.136 (2017).
- [13] Allaire, B. T. et al. Medical Care Costs of Breast Cancer in Privately Insured Women Aged 18-44 Years. *Am J Prev Med* 50, 270-277,

- doi:10.1016/j.amepre.2015.08.035 (2016).
- [14] Han, S., Jang, B. H., Suh, H. S. & Hwang, D. S. Complementary medicine use and costs in patients with breast cancer who experienced treatment-related side effects: A cross-sectional survey in Korea. *Complement Ther Med* 44, 210-217, doi:10.1016/j.ctim.2019.04.013 (2019).
- [15] Coughlin, S. S., Ayyala, D. N., Tingen, M. S. & Cortes, J. E. Financial distress among breast cancer survivors. *Curr Cancer Rep* 2, 48-53, doi:10.25082/ccr.2020.01.004 (2020).
- [16] Goldstein, D. A. Financial toxicity in cancer care-Edging toward solutions. *Cancer* 123, 1301-1302, doi:10.1002/cncr.30555 (2017).
- [17] Jaggi, R. et al. Unmet need for clinician engagement regarding financial toxicity after diagnosis of breast cancer. *Cancer* 124, 3668-3676, doi:10.1002/cncr.31532 (2018).
- [18] Fischer, K. A., Walling, A., Wenger, N. & Glaspy, J. Cost health literacy as a physician skill-set: the relationship between oncologist reported knowledge and engagement with patients on financial toxicity. *Support Care Cancer* 28, 5709-5715, doi:10.1007/s00520-020-05406-z (2020).
- [19] Ehsan, A. N. et al. Financial Toxicity Among Patients With Breast Cancer Worldwide: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Netw Open* 6, e2255388, doi:10.1001/jamanetworkopen.2022.55388 (2023).
- [20] Kajimoto, Y. et al. Validity of the COmprehensive Score for financial Toxicity (COST) in patients with gynecologic cancer. *Int J Gynecol Cancer*, doi:10.1136/ijgc-2022-003410 (2022).
- [21] 国土交通省国土地理院 都道府県の庁舎及び東西南北端点の経緯度(世界測地系)
<https://www.gsi.go.jp/common/000230936.pdf>
- [22] 総務省統計局 日本の統計ハンドブック 2022
<https://www.stat.go.jp/english/data/handbook/pdf/2022all.pdf>
- [23] Honda, K. et al. A prospective survey of comprehensive score for financial toxicity in Japanese cancer patients: report on a pilot study. *Ecancermedicallscience* 12, 847, doi:10.3332/ecancer.2018.847 (2018).
- [24] Honda, K. et al. Prospective Survey of Financial Toxicity Measured by the Comprehensive Score for Financial Toxicity in Japanese Patients With Cancer. *J Glob Oncol* 5, 1-8, doi:10.1200/jgo.19.00003 (2019).
- [25] de Souza, J. A. et al. The development of a financial toxicity patient-reported outcome in cancer: The COST measure. *Cancer* 120, 3245-3253, doi:10.1002/cncr.28814 (2014).

- [26] de Souza, J. A. et al. Measuring financial toxicity as a clinically relevant patient-reported outcome: The validation of the COmprehensive Score for financial Toxicity (COST). *Cancer* 123, 476-484, doi:10.1002/cncr.30369 (2017).
- [27] Souza, J. A. D. et al. Validation of a financial toxicity (FT) grading system. *Journal of Clinical Oncology* 35, 6615-6615, doi:10.1200/JCO.2017.35.15_suppl.6615 (2017).
- [28] Kajimoto, Y. et al. Association between financial toxicity and health-related quality of life of patients with gynecologic cancer. *Int J Clin Oncol*, doi:10.1007/s10147-023-02294-1 (2023).
- [29] 補足ファイル
https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1007%2Fs12282-023-01476-z/MediaObjects/12282_2023_1476_MOESM1_ESM.xlsx
- [30] Resnicow, K., Patel, M. R., McLeod, M. C., Katz, S. J. & Jagsi, R. Physician attitudes about cost consciousness for breast cancer treatment: differences by cancer subspecialty. *Breast Cancer Res Treat* 173, 31-36, doi:10.1007/s10549-018-4976-7 (2019).
- [31] 高橋武則・川崎昌 『アンケートによる調査と仮想実験：顧客満足度の把握と向上』 (日科技連出版社, 2019).
- [32] Ministry of Health, L. a. W., Japan. To all users of the high-cost medical care benefit system.
<https://www.mhlw.go.jp/content/000333279.pdf>
- [33] Smith, G. L. et al. Navigating financial toxicity in patients with cancer: A multidisciplinary management approach. *CA Cancer J Clin* 72, 437-453, doi:10.3322/caac.21730 (2022).
- [34] Khera, N., Holland, J. C. & Griffin, J. M. Setting the stage for universal financial distress screening in routine cancer care. *Cancer* 123, 4092-4096, doi:10.1002/cncr.30940 (2017).
- [35] Kuba, S. et al. Protocol for studying the efficiency of ChemoCalc software in helping patients to understand drug treatment costs for breast cancer: A multicenter, open-label, randomized phase 2 study. *Contemp Clin Trials Commun* 21, 100739, doi:10.1016/j.conctc.2021.100739 (2021).
- [36] Iwatani, T. et al. Prospective observational study estimating willingness-to-pay for breast cancer treatments through contingent valuation method in Japanese breast cancer patients (JCOG1709A). *Jpn J Clin Oncol* 51, 498-503, doi:10.1093/jjco/hyaa241 (2021).
- [37] Hara, F., Tajima, K. & Tanabe, K. Current situation and challenges regarding biosimilars in Japan: an example of trastuzumab biosimilars for breast cancer. *Future Oncol* 15, 1353-1361, doi:10.2217/fon-2018-0957 (2019).

- [38] Saeki, S. et al. Factors associated with financial toxicity in patients with breast cancer in Japan: a comparison of patient and physician perspectives. *Breast Cancer* 30, 820-830, doi:10.1007/s12282-023-01476-z (2023).

問題解決と課題達成のための質問紙調査と仮想実験

Questionnaire Survey and Virtual Experiment for Problem Solving and Task Achieving

高橋 武則¹

Takenori TAKAHASHI

【要旨】

これまでの質問紙調査(アンケート調査)事例の多くは調査データを分析した上で考察の段階で終了している。一部には考察に基づいた提案を行うケースも存在するが、その場合の提案はあくまでも仮説発想(「こうすれば」という考えを示すこと)で留まっており、提案の客観的根拠である仮説検証(検証実験)までを行ったケースの発表は殆ど存在していない。

問題解決や課題達成とリンクした具体的な提案をエビデンスつきで明示するためにはその根拠となる実験が必要である。この選択肢としてコンジョイント分析がある。しかし従来のコンジョイント分析のほとんどはこれ単独の取組みであり、かつその分析も3つの特徴(①すべての因子を質的に扱っている、②交互作用や2次項を無視している、③実験計画は要因実験か直交表実験である)を持つという極めて窮屈な(限定的な)実験である。

本研究は結果のデータの採り方の工夫および構造模型表と最適計画を用いた実験(本研究では仮想実験と呼ぶ)を紹介する。仮想実験において結果データは連続尺度が望ましいことは数理的に明らかである。しかし、いきなり連続尺度での評価は回答者に負担をかけるとともに信頼の置けないデータである。本研究はこれに対して調整型階差按分法を提案する。

人間を対象とした調査および実験では回答者の層別は重要である。層間で違いがある場合に層別をせずに分析を行うと大きな間違いが生じる。しかしながら回答者属性の全てで層別をすることはたいへんであるしその多くは無意味である。本研究は層別のための合理的なアプローチについても提案を行っている。

【キーワード】 両側因果分析、仮想実験、最適計画、階差按分評価法、層別分析

Abstract

Most of the past cases of questionnaire surveys (surveys of questionnaires) have ended at the stage of discussion. There are some cases in which a proposal is made based on the discussion, but in such cases, the proposal remains only a hypothetical idea (i.e., an expression of an idea), and there are almost no published cases in which the objective basis for the proposal, i.e., hypothesis testing (verification experiment), has been

¹ 高橋 武則 (Takenori TAKAHASHI) 統計数理研究所

conducted.

In order to clearly present concrete proposals with evidence that are linked to solving a problem or accomplishing a task, experiments are needed to provide the evidence for the proposals. Conjoint analysis is an option for this purpose. However, most conventional conjoint analysis is a stand-alone effort, and the analysis is extremely cramped (limited) with three characteristics (1) all factors are treated qualitatively, (2) interactions and quadratic terms are ignored, and (3) the experimental design is either factorial or orthogonal array experiments.

This paper introduces an experiment (called a virtual experiment in this study) using a structural model table and an optimal design, as well as an ingenious way of taking the resultant data. It is mathematically clear that a continuous scale is desirable for the outcome data in a virtual experiment. However, continuous scale evaluation is unreliable as well as burdensome for respondents. This paper proposes an adjusted evaluation method to prorate differences.

Respondent stratification is important in surveys and experiments with human subjects. If there are differences among the strata, analysis without stratification can lead to major errors. However, stratification by all of the respondent attributes is difficult and often pointless. This paper also proposes a rational approach to stratification.

Keywords: both side causal analysis, virtual experiment, optimal design, evaluation method to prorate differences, stratified analysis

1. はじめに

質問紙（アンケート）を用いる総合的な研究の本質的な構造は前半と後半の2つのパートから構成される。両者は後者が前者を受け継ぐという点で強く関連している。

前半のパートは研究対象がどうなっているのかの状態把握と手を打つべき対象の選定である。この最後では打つべき手の方向性(仮説)が示されることもあるがそれは概要の紹介で具体的な内容の明示ではない。

一方、手を打つべき対象が示された場合には具体的な対策が必要になる。これを明らかにするのが後半のパートである。ここでは仮想実験（仮想評価実験）という形で対象者自らが回答したデータというエビデンスに基づいて因子(何を)と水準(どの状態で)を決定するということが重要である。なお実務では対策実施と効果確認までが要求される。しかし、それにはかなりの時間を必要とするので対策の明示で一区切りとして発表を行い、対策実施と効果確認は後日報告することが多い。実務で成果を確実に上げるという観点からは質問紙調査と対策立案がセットとなったアプローチが必要である。本研究は両者のための新しい方法について論じる。

なお、本研究は問題解決と課題達成については以下の様にとらえている。

問題とは「あるべき姿と現状の乖離」である。

問題解決とはこれを解消することである。

課題とは「ありたい姿と現状の乖離」である。

課題達成とはありたい姿を実現（ステップアップ）することである。

人間を相手にした場合には問題／課題を見つける手段が質問紙調査で、それを解決する方法／実現する方法を立案するための情報を獲得する手段が評価実験である。本研究では前者のための方法として「両側因果分析」^{[13][15]}を論じ、後者のための方法として「仮想実験」^{[8][14]}を論じる。

2. 前半のパート(両側因果分析)と後半のパート(仮想実験)の概要

詳細は後の章で議論するとして本章では前半のパートと後半のパートの概要を示す。このことで全体の見通しを明らかにすることができる。

2.1. 前半のパート(両側因果分析)の概要

調査は一期一会(事後に再び聞くことはできない)なので聞き漏らしがあってはならない。したがって質問の間に重複があっても知りたいことはしっかりと聞く。このため調査は以下の特徴を有することになる。

*質問項目は多くなる。*質問間の相関は強くなる。*層別が必要になることが多い。したがって次に述べるポイントが重要になる。

2.1.1 両側因果分析のポイント

[A]信頼のおける量的データをとる。

客観的な分析のためには連続尺度の数値データが重要である。多数の質問項目に対して各々を10点満点評価や100点満点評価をすることは回答者に大きな負担をかけるとともに得られたデータはあまり信用できない。この場合はいかに示す7段階評価を採用することを推奨する。

1:非常に悪い, 2:かなり悪い, 3:やや悪い, 4:どちらとも言えない

5:やや良い, 6:かなり良い, 7:とても良い

上記の7段階評価のデータは以下に示す点で優れている。

<1>直感的に評価ができるので回答者に大きな負担をかけない。

<2>厳密には順序尺度であるが細かく分けているので連続尺度に近い性質を持っている。

<3>7段階なので最小の1や最大の7は安易に付けないので分布は単峰となることが多い。

<4>7段階なので天井効果(多くが上限に偏る)や床効果(多くが下限に偏る)を回避できる。

【注】5段階評価の場合には天井効果や床効果が出易い。

[B]関連の問題は主成分で回避する。

<1>質問項目間の相関の問題は主成分で回避する。

<2><1>のために「合理的な群分け」を行う。

※「合理的な群分けとは、群内の項目は相関が強く群間の項目は相関が低くなるような群分けのこと」である。事前に似た項目をまとめて群を構成する。事後に主成分分析を行い因子負荷量図で群分けを行って、事前に構成した群に問題があれば群の再構成を行う。再構成の際には主成分分析の結果だけで行うのではなく固有技術的な検討も加味して行うことが重要である。

<3>結果系の主成分と原因系の主成分の間で変数選択の回帰分析により重要主成分を選択する。選択された重要主成分に対する因子負荷量の絶対値の大きな項目が主要項目で、これらが手を打つ対象である。

※主成分は項目の線形結合なので手を打つことはできないが、複数の項目の背後にある因子(根本原因)には手を打つことができる。

<4>群において主要項目が少ない場合(1 ないし 2)にはそれに対して手を打つ。もし群において主要項目が多い場合にはそれらの背後の根本原因を因子分析で炙り出してそれに手を打つ。

[C]層別について吟味し層別が必要と判断した場合には層ごとに分析を行う。しかし不必要と判断したならば層別を行うことは控えなければならない。

※人間を対象としたデータ分析においては常に層別について配慮することが不可欠である。何故ならば、異なる層を混ぜると誤った分析となり、無意味に複数の層に細分化すると各層のデータ数が少なくなることで精度が悪くなるとともに細分化された層の間の見かけ上の無意味な違いに振り回されるリスクが生じる。この質問項目の多い調査における層別の吟味方法については2.1.3で詳述する。

2.1.2 重点指向

実際の問題に対して手を打って成果を上げるためには資源(ヒト、モノ、カネ、ジカン)が有限である限り資源の集中投入が必要で、このためには重点指向が不可欠である。このアプローチに有効なのは虫瞰図のDCA(両側因果分析)である。

事例研究は目的実現のための地図を作り目標値にアプローチすることに似ている。地図には鳥瞰図(全域地図)と虫瞰図(局所地図)とがある。アンケート調査の分析では以下の様になる。

* 鳥瞰図のSEM(構造方程式モデリング)

* 虫瞰図のDCA(両側因果分析)

両者には特徴があるので使い分ける必要がある。本研究は問題解決・課題達成において重点指向のスタンスに立った会うアプローチを行う。必要な3つの統計的手法は以下のものである。いずれも重点指向にとって有用な手法である。

* 主成分分析：多項目を要約し重要なものを選択

- * 回帰分析：多候補から変数選択で重要なものを選択
- * 因子分析：多項目の背後の数個の根本原因を抽出

2.1.3 質問項目の多い調査における層別の吟味方法

質問紙調査では回答者属性の情報がとられているのでこの情報を活用する。しかし、これは事前（調査が行われる前）に用意されているので有効な場合もあれば有効でない場合もある。ときには事後の分析に基づいて事後層別をする場合もある。

<1>全項目（結果系項目と原因系項目の全て）で主成分分析を行い上位の主成分に注目する。

注目する主成分の因子負荷量図上で明らかなグループの存在を吟味する。

<2>因子負荷量図上で明らかなグループが存在する場合には層別をする必要がある。図上のグループに対応する回答者属性を調べる。

※事前に用意した回答者属性に基づく情報で層が見付からない場合には事後にいろいろと考えて層を推測する。明らかなグループが存在する以上は層ごとに分析をしなければならない。そしてその層に関して推測をしなければならない。

<3>因子負荷量図上で明らかなグループが存在しない場合でも必ず回答者属性を用いて層別の吟味を行う。

※この場合の手掛かりは回答者属性の情報である。注目する主成分に関して回答者属性を用いて決定木分析（量的属性の場合には回帰木分析、質的属性の場合には分類木分析）で層別の吟味を行う。図上で明確なグループを形成していなくてもしっかりとした寄与率で分岐するならばその属性で層別を行う。

<4>可能であればより詳細な層別を検討する。それは結果系のみ項目を用いた層別の検討と原因系のみ項目を用いた層別の検討である。

※これは手間がかかって面倒ではあるが有用な情報が得られる場合がある。多くの場合は結果を原因が説明するという場合には両者の間には強い相関があるので全項目（結果系項目と原因系項目の全項目）の主成分で検討をすればよい。しかし、層によって因果構造が大きく異なる場合には相殺により全項目では層を発見しにくいことになる。したがって、全項目を用いた検討で層別は不必要となった場合に結果系のみ項目を用いた層別の検討と原因系のみ項目を用いた層別の検討を行うことはトライする価値がある。

2.2 後半のパート(仮想実験)の概要

具体的な対策を設計するためには取り上げるべき因子と水準の候補を明らかにしなければならない。その上で模型（因果構造の数式）を推定するために実験を行う必要がある。こ

のためは前半の調査をベースにした実験（正確には仮想実験）という新たなアプローチが必要である。

2.2.1 仮想実験(仮想評価実験)のポイント

[A]信頼のおけるデータをとる。

1)内容が良く分かりかつ安定した説明をする。

※①前提条件の明示,②可視化の工夫,③説明の統一のための動画の活用

2)点数評価(量的データ)をとり易くする。

※順序評価をした後に階差按分法で点数を求める。可能なら最後に調整を行うと良い。

[B]実験としてのレベル(模型構造)を高める。

3)工夫して量的因子にした上で水準幅を広くとる。

※安易に質的因子にはせずで量的因子にする。

4)積項と2次項を視野に入れた模型化をする。

※解析模型表(2.3節で詳述)を作り最適計画で実験を行う。

最適計画ではVIFで直交性の劣化を把握する。

従来は要因配置計画や直交計画が用いられた。^[8]

[C]層間の違いに注意する。

5)層別の可否を主成分分析と回帰分析で判断する。

※評価データを主成分分析して上位の主成分を目的変数にし属性を説明変数として変数選択を行う。

・層間の違いがあれば層別しなければならない。

・層間に有意な違いがなければ層を合併する。

[D]重点指向する。

6)重点を絞りそうでないものは対象から外す。

※有意でないもの、寄与率の低いものは外す。

[E]動画を活用する。

7)広い対象に対して分かり易い説明をばらつきなく行うには動画の利用が望ましい。

※近年盛んに用いられているWeb調査では多数の個人が自分の都合の良い時間にバラバラで回答するので動画による統一された説明の持つ意味は大きい。

2.2.2 仮想実験における複数の層に関する合併と層別

仮想実験は人間が評価したデータで分析するので層に関して十分な注意が必要である。このためには実験に際して回答者の属性をフェイスシート項目としてしっかりと聞いておく。もともと仮想実験の分析は個人ごとに行うことができる。しかしながら、似た者同士はまとめて層としてそれらの平均値で分析することが望ましい。ところが、異質の層をまとめて分析をすると効果の間で相殺が起きて分析を大きく誤るリスクがある。

*複数の層が似ている場合には合併した方がデータ数が増えて信頼の置ける結果が得られる。

*複数の層が異なっている場合には層別しなければ分析を誤るので必ず層別をする。このため、層別すべきかどうかの判断が重要になる。このための方法は以下の様に行う。

*全員のデータで主成分分析を行う。

これは回答の類似性を要約したものなのでこれと属性との関係を見ることで層別の必要性が吟味できる。

*主成分の性質上から上位の主成分(第1主成分, 2主成分)について吟味すれば十分である。

*属性は組み合わせの場合もあり得るので、変数選択の際には属性の主効果と属性の交互作用も選択対象にする。

*変数選択の結果で判断する。

- ・選択されなかった場合は層別の必要はないと判断する。
- ・主効果が1つ選択された場合にはその属性で層別する。
- ・主効果が2つ選択された場合にはそれらの属性の組合せで層別する。
- ・交互作用が選択されたらその属性の組合せで層別する。

時には後知恵として次の様な場合もある。主成分分析の結果として上位の主成分(第1主成分, 2主成分)について主成分得点の散布図(主成分得点図)を描いた場合に図上に明確なグループが現れたらそれらの背後にあるものは何かを調べ、明らかになった場合にはそれで層別する。ただし、図上に現れたグループで層別してはならない。図はあくまでも層別を検討するためのもので、層が分ったら層で分けるべきである。したがって、図上のグループの一部には複数の層が混在することになる。

2.2.3 解析模型表(事前予想)と構造模型表(事後整理)

仮想実験を行う場合に多数の因子とそのもとの複雑な模型(積項および2次項)を扱わなければならない。かつてのコンジョイント実験ではそれほど多くない因子に対して簡単な模型(そのほとんどが質的因子で主効果のみ)であった。しかし、多数の量的因子で水準幅を広くとると積項と2次項は無視できない。これらが登場する複雑な模型を扱う上でシステマティックな一つは不可欠である。

模型に関して事前には予想を可視化し、事後には整理を可視化する必要がある。このためのツールとして事前用の解析模型表と事後用の構造模型表を提案する。

2.3 解析模型表

実践的な仮想実験では積項と2次項に注意を払わなければならない。有効な設計をするためには以下のことが必要である。

- [1]因子(変数:説明変数,独立変数)を多数取り上げる。

[2]因子の水準幅を広くとる。

その結果として以下のことが避けられない。

[1]より積項が無視できなくなり、

[2]より2次項が無視できなくなる。

これをカバーするための実験は必然的にサイズが大きくなる。

しかし、人間が評価を行う仮想実験の場合には実験サイズをあまり大きくすることはできない。このために重要なことは実験サイズの縮小で、それは最適計画で実現することができる。ただし、実験サイズの縮小は項の間の直交性(独立性)の劣化を伴うために実験計画の立て方については十分に慎重に行わなければならない。このためのポイントは以下の2つである。

[A]解析模型表を作成してダイナミックに計画立案のPDCAサイクルを回す。

[B]とりあえず立てた計画をVIFを用いて評価する。

[A]の解析模型表は予想をシステマティックに可視化するものである。ここで大事なことは重点指向である。

*強い効果のあるものは外してはならない。

*効果の小さなものは大胆に外すことを恐れない。

最終的には変数選択の重回帰分析で効いている項を選択するわけであるが、その場合には寄与率に注目する。寄与率の大きなものは外してはならないが、寄与率の小さなものは大胆に外すことが重要である。このためには強さの程度を書き込んだ解析模型表を作成する。これは変数の行列で、非主対角要素が積項で主対角要素が2次項を意味する。該当するセルに予想される効果のレベルを以下の様に記号で明示する。なお、それぞれの技号の後の括弧の中に意味と採用に対する姿勢を示している。

◎：強(しっかりある:必須)

○：中(ある:原則として採用)

△：弱(ないわけではない:余裕があれば採用)

？：不明(あるかもしれない:△より優先して判断)

×：無(あってもかなり弱いものは無とする)

－：非該当(質的変数の2次項はあり得ない)

ただし上記の判断は以下の2つの明示が不可欠である。

[1]前提条件(実験では水準を振らないがその水準で結果が大きく変化するものとその水準のこと)

※前提条件が異なると様相は大きく変化する。

[2]実験で取り上げる因子と水準(これを明示しなければ解析模型表は作成することができない)

※水準の中央をどこに採るのか、そして水準幅が狭いか広いかで様相は大きく変化する。

表1 仮想実験事例の解析模型表（効果の予想）

| 因子 | 1次効果 | X1教育 | X2評価 | X3人数 | X4残業 | X5通勤 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| X1教育 | ○ | × | △ | × | × | × |
| X2評価 | ○ | | × | △ | ○ | × |
| X3人数 | ○ | | | ○ | × | × |
| X4残業 | ○ | | | | ◎ | ○ |
| X5通勤 | ○ | | | | | × |

【凡例】 ◎:強(必須) ○:中(採用が原則) △:弱(余裕ありなら採用) ×:無(無視)

なお、解析模型表は予想なのでナーバスにはならない方が良い。実験アプローチには最後に「回帰修正」というリカバー方法もあるのでどこかで割り切るのが良い。

解析模型表に登場するすべてのものを取り上げることはできない。◎と○は必ず取り上げ、次に？があればそれを取り上げるかどうか検討する。もし存在した場合には大きな影響があるかもしれないと思われたら取り上げるべきであるが、そうでなければパスすることを考える。その次に検討するのは△で、これは実験サイズに余裕があれば採用し余裕がなければパスするという取扱いになる。余裕があるかないかは、可能な実験サイズと必要な実験サイズの綱引きとなる。このために必要な実験サイズはVIFに基づいて吟味する（【注】を参照）。

解析模型表を作成し、これを用いて最適計画を立てる。この場合に最低必要な実験サイズは以下のものである。

主効果の数+取り上げる積項の数
+取り上げる2次項の数+誤差のための数

【注】 誤差のための数は最低の数として1は必要で可能ならば3が望ましい。

誤差の自由度はできれば3が必要であるが、変数選択でいくつかは選択されないで誤差のための数は1が良い。

解析模型表にしたがって統計ソフトで最適計画を立ててみる。出来上がった最適計画の結果(y)に対して仮の数値を入れて全数選択したうえでVIFを求める。この最大値が1.25以下(1.5でも可)であれば採用して良い。もしこれを満たさない場合には実験回数を増やせばVIFの最大値は小さくなるので、その時の実験サイズを把握して吟味する。その後は取り上げる項を変更したり実験サイズを変更したりしてどこかで手を打つことになる。

【注】 実際には変数選択を行うので選択されない項が現れるため実際の結果での最大VIFは計画時の最大VIFよりも小さくなる。このため全数選択しても大丈夫な1.25が望ましいが、変数選択で選択されないものが出るので計画時では全数選択のもとでの最大VIFは1.5未満で計画しても多くの場合の結果は1.25に近づくので問題がない。

2.4 構造模型表

実験を実施して得たデータで分析をすると模型が得られる。これを合理的に可視化する必要がある。特に層が複数ある場合には層間の比較が重要になる。このためのツールとして構造模型表を提案する。数理的な本質は解析模型表と同じであるが大きな違いは構造模型表は予想ではなくて結果という事実であるということである。すなわちそれぞれの項に関して効いていたか効かなかったか、効いていたものは強いのか弱いのか、その符号は正か負かを明示する必要がある。事前の予想である解析模型表と異なりすべての結果があるのでそれをコンパクトに整理することがポイントである。

*効いているか効いていないかは重回帰分析の変数選択で判断する。

※計画で VIF の配慮(1.0 に近くなるように実験を計画)をしているので変数選択に大きな問題はあり得ない。

*ただし、選択されたからといっても p 値に注意し、p 値の大きなものは参考情報として扱う。

*推定式の解釈には 4 種類の情報をうまく活用する。

※積項や 2 次項がなければ簡単であるがこれらがある場合には十分な注意が必要である。

1) 偏回帰係数(妥当な変数変換をしたもとの変数選択後に展開式にしたもの)

因子が 1 単位変化した場合の増分なので積項や 2 次項がなければ直感的に理解しやすい。

積項や 2 次項がある場合には中心化変換のもとの偏回帰係数で解釈をする。ただし係数の絶対値の大きさは項の重要性とは関係しないことに注意が必要である。

2) 中心化変換のもとの偏回帰係数

基本的には偏回帰係数と同様であるが数理的にはこちらの方が望ましい。

積項や 2 次項がある場合には中心化変換のもとの偏回帰係数で解釈をする。

3) 標準偏回帰係数

各項のパワーを比較することに向いているが式の固有技術的な解釈には向かない。

4) 総合的にはコード化変換の係数の方が便利である。

・コード化変換の係数

各項のパワーの比較ができかつ式の解釈も可能であるが、式の解釈は簡単なものではない。

式の構造を理解できればコード化変換の係数が望ましい。

*どこまでを取り上げるかの判断のためには上記の各種係数を利用するのはあまり向かない。何故ならば振り分ける基準がクリアでないからである。

※この判断には寄与率か p 値が向いている。

VIF がおさえてあるので以下の基準が分かり易い。

・寄与率 5%未満は取り上げない。

・p 値が 5%を超えたものは取り上げない。

表2 【層1】の構造模型表(結果の整理)

| 因子 | 1次効果 | X1教育 | X2評価 | X3人数 | X4残業 | X5通勤 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| X1教育 | ◎(+) | / | / | / | / | / |
| X2評価 | △(+) | | / | | × | / |
| X3人数 | ◎(+) | | | ○(-) | / | / |
| X4残業 | △(-) | | | | ○(-) | △(-) |
| X5通勤 | ◎(+) | | | | | / |

[凡例] ◎:強(<0.01) ○:中(0.01~0.05) △:弱(0.05>) ×:なし(非選択)

表3 【層2】の構造模型表(結果の整理)

| 因子 | 1次効果 | X1教育 | X2評価 | X3人数 | X4残業 | X5通勤 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| X1教育 | ◎(+) | / | / | / | / | / |
| X2評価 | △(+) | | / | | × | / |
| X3人数 | ◎(-) | | | ○(-) | / | / |
| X4残業 | ○(-) | | | | × | △(-) |
| X5通勤 | ◎(-) | | | | | / |

[凡例] ◎:強(<0.01) ○:中(0.01~0.05) △:弱(0.05>) ×:なし(非選択)

2.4.1 複数の層の間の比較

層が複数ある場合には層間の比較が重要になる。その際に構造模型表は有用である。表2と表3が示すように複数の層における特徴が簡潔でシステマティックに表記されているので層間の比較は明快である。表という構造的な可視化により複雑な比較が容易に可能になる。複数の込み入った数式が[挙げられる場合に比べて]相関の違いをはるかに理解し易い。

2.4.2 多視点の評価(4つの視点)

近年は CE(顧客満足度)の向上とともに ES(従業員満足度)の向上が注目されている。ESの場合には従業員だけに焦点を合わせるのではなく顧客と上司も視野に入れる必要がある。つまり少なくとも 3 者の視点から総合的に判断する必要がある。場合によっては専門家という第4の視点による評価も加える必要がある。

例えば社員教育(従業員教育)を扱う場合、どのような教育を行うかを設計するにあたり、従業員とともに顧客および上司も対象にする必要がある。更に、これらに加えて教育の専門家の評価も無視できない。したがって、仮想実験では同じカードの評価を4者が行って、それぞれの分析を行う。その上で4者の分析結果を総合して最終結論を下すことが重要である。

この場合の仮想実験では用意された同じカード(社員教育に関する因子と水準の組合せ)に対してどう評価するかには以下の4つの視点が存在する。

1.[顧客の視点]: 受けて欲しい。

こういう教育を受けた人からサービスを受けたい。

2.[本人の視点]: 受けたい。

こういう教育を受けて実力を付けたい。

3.[上司の視点]: 受けさせたい。

こういう教育を受けさせたい。

4.[専門家の視点]: 効果がどの程度か。

この教育はどの程度の効果が見込めるのか。

上記の視点のいずれかにのみ偏ることなく総合的にバランスをとって最終判断をすることが重要である。

3. 両側因果分析

両側因果分析^{[13][15]}は結果系と原因系に関する多数の質問項目に対して群を構成した上で主成分を触媒的に用いて重点指向に基づいた因果関係を把握する分析である。手を打つべき項目が少数ならそれらに直接手を打ち(表側因果), 多数の場合にはそれらの背後の根本原因を因子分析で因子として炙り出して手を打つ(裏側因果)ためにこの方法は両側因果分析と呼ばれている。この分析での要点は**回答者の層別**と**項目の群分け**である。本研究は両者について議論する。

因果分析とは原因と結果の関係を明らかにすることである。質問数の少ない単純な因果関係の場合には手を打つべき重要原因項目(主要項目)は少ないためにそれらに直接手を打てばよい。このような因果関係を「表側の因果関係」と呼ぶ。しかし、質問数の多い複雑な因果関係の場合には手を打つべき重要原因項目が多くなりそれらに手を打つことは不可能あるいは非効率となる。このような場合には多数の重要原因項目の背後にある(裏側にある)根本原因を炙り出してそれに手を打つことが望ましい。この根本原因を炙り出すために有用なのが因子分析である。そして因子(根本原因)と結果との因果関係のことを本研究では「裏側の因果関係」と呼ぶ。大規模な調整の場合には表側の因果関係と裏側の因果関係が併存することになり、これを両側因果関係と呼ぶ。そしてこの両側因果関係を明らかにするアプローチを両側因果分析と呼ぶ。

人間を対象とした調査(質問紙調査)および実験(仮想実験)において層別はとても重要である。本研究は層別の検討方法(吟味方法)について議論する。その際、質問項目(以下では項目と略す)に関する群構成とは相関の強弱(濃淡)をベースに項目を群という塊(集合)を作ることである。この場合の群とは以下の特徴を持った質問項目の塊(集合)のことである。

- * 群内の項目の間には強い相関がある。
- * 群間の項目の間には弱い相関がある。

上記の群構成ができれば主成分を用いて合理的な因果関係の把握をすることができる。すなわち群ごとに主成分を抽出すればそれらは以下の性質を有している。

- * 群内の主成分は完全に独立である。
- * 群間の主成分は相関が弱い。

したがって、注目する結果(総合満足度, 個別満足度の上位の主成分)を目的変数, 群ごとに抽出した主成分を説明変数とした重回帰分析で変数選択を行う。その結果として選択された重要な主成分に関して群ごとに因子負荷量の絶対値の大きな項目が手を打つべき主要項目となる。この主要項目が少なければ直接それに手を打つが, 多ければそれらの背後の因子(根本原因)に手を打つ。

この場合の因果関係には表側の因果関係と裏側の因果関係がある。

* 表側の因果関係

主要項目(表にあって見える直接原因)と結果の関係

* 裏側の因果関係

因子(裏にあって見えない根本原因)と結果の関係

質問項目が多い場合には両者が混在することになる。すなわち、群によって表側因果関係だったり裏側因果関係だったりするわけである。

この結果を可視化したものが図1である。項目は四角形、主成分は菱形、因子は楕円で表現している。色のついていないものが手を打つべきもので、同じ群で多数ある場合には背後の因子を炙り出している。この図よりこの例では両側因果関係がある場合の意味が見てとれる。

手を打つべきものが明らかになると多くの人は理解し易い。このために最初に作成する図1の(1)に示す構造模型図を反転させたものが図1の(2)に示すである。この例では裏側の因子(根本原因)に手を打つケースだが、表側の項目に手を打つとともに裏側の因子に手を打つという表と裏が混在する場合もある。

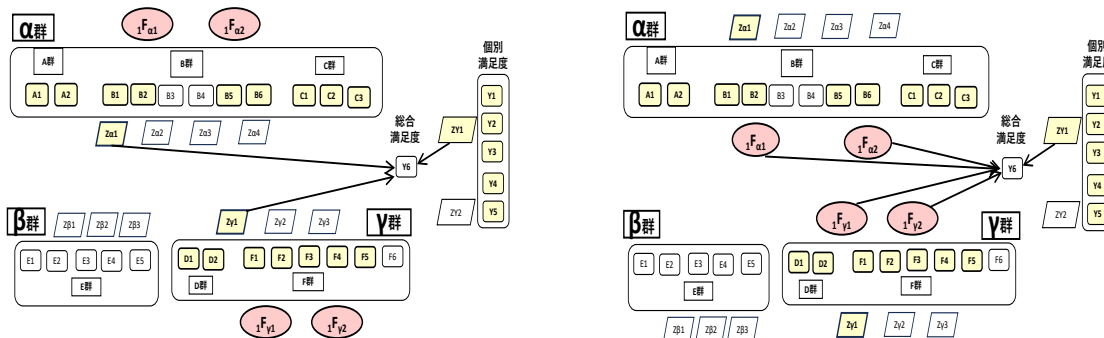
3.1 質問紙調査と仮想実験のセット

調査研究の多くは調査データを分析して現状を把握し、それに基づいて考察をして完結することが多い。考察の後に提案を行う研究もある。しかし、考察は調査データという事実直結しているが、提案はあくまでも「仮説」であること、そして具体的ではないことに注意しなければならない。すなわち提案はエビデンスに基づいておらず、多くの提案は大きな方向を示す抽象的な表現となっている。具体的な提案とは「何を(因子)」と「どうする(水準)」を明示したものである。このために有効なアプローチは実験(仮想実験, 評価実験)である。つまり「調査」を前半部分とし「実験」を後半部分としたセットでのアプローチが望ましい。

質問紙調査: 「調べなければ分からない」

* 現状はどうなっているのか?

* 何が問題か(手を打つべきものは何か)?



(1) 両側因果分析の構造模型図の例

(2) 両側因果分析の構造模型図の反転表示の例

図1 両側因果分析の構造模型図とその反転表示の例

*問題の原因は何か？

仮想実験：「手を打たなければ成果なし」

*具体的な条件を明示して評価してもらう

「因子(何を)」と「水準(どうする)」の明示

*各因子の効き方の把握と具体的な施策の決定

3.2 質問紙調査における回答者の層別

3.2.1 多数の質問項目に基づく層別

多数の回答者は様々な特徴(背景, 考え方, 嗜好ほか)を持ったものが混在していて一様ではない。これを一まとめにして分析を行うと様々な特徴が相殺されてしまうために誤った結論を導くリスクがある。また, 一まとめにして分析を行うために様々なタイプの人々の特徴を抽出することができない。

似た回答をする回答者をまとめて層にすることで上記のリスクを回避することができる。そして層ごとの特徴を抽出することができる。このためには合理的な層別アプローチが必要になる。

回答者の層別で注意すべきことは「結果系項目」と「原因系項目」を合わせた全項目に基づいて層別をしなければならないということである。

*結果系項目の評価が似ていても原因系項目の評価が異なる場合がある。

*原因系項目の評価が似ていても結果系項目の評価が異なる場合がある。

全体的な特徴・傾向として以下のものがある。

*原因系項目と結果系項目の間には相関がある。

因果関係があると考えて原因系項目を取り上げているので原因系項目と結果系項目の多くのもの間には相関があることは当然である。

*結果系項目の間には構造的な相関がある。

原因系項目を多数取り上げるとそれらの間に相関が生じる。この相関には濃淡があり、濃いもの同士を集めて群を構成すると原因系項目全体を群編成することができる。

最初に行うべきは層別の要不要の検討である。層別が必要な場合に層別せずに合併の形で分析をすると誤った結論を導くことになる。したがって項目の群分けの前に層別の要不要を行わなければならない。層別が必要となった場合には層ごとに質問項目の群分けを行わなければならない。

この場合のポイントは主成分分析と回帰分析と判別分析である。因果関係の考えられるデータなので結果系のデータと原因系のデータには強い相関が考えられる。したがって全データで主成分分析を行って上位の主成分(主に第1主成分と第2主成分で、ときには第3主成分も視野に入れる)に注目する。属性(層)により違いがあるとすれば、属性を説明変数にして上位の主成分を目的変数として回帰分析を行えばよい。

3.2.2 層別検討のアプローチ

回答者の層別の要不要の検討は以下の2つのアプローチによって行う。

- (1)回答者属性：層別のベースは回答者属性である。
- (2)図上の塊：図上に塊があれば強いヒントになる

主成分得点図上に明確な塊が出現した場合にそれが層別のヒントになる。

※しかし最終的に層別を行うのは回答者属性である。なお、主成分得点図において明確に塊が現れないと目視による層の発見は難しい。

回答者属性がある場合はそのヒントを回帰分析あるいは決定木(分類木, 回帰木)の適用によって得ることができる。層別の可能性の情報が得られたら「判別分析」で確認をする。この場合は上位の主成分を順次加えて誤判別率の変化を見て総合的に判断を行うとよい。

【注】以上のアプローチは主成分を層別の吟味の情報として用いているので主成分の意味を読み解くことは不要である。

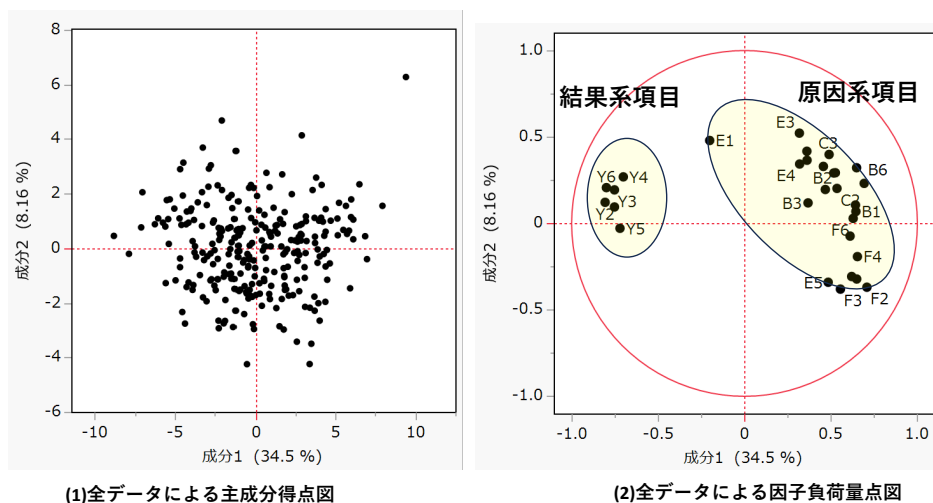


図2 結果系と原因系の全データによる主成分分析の結果

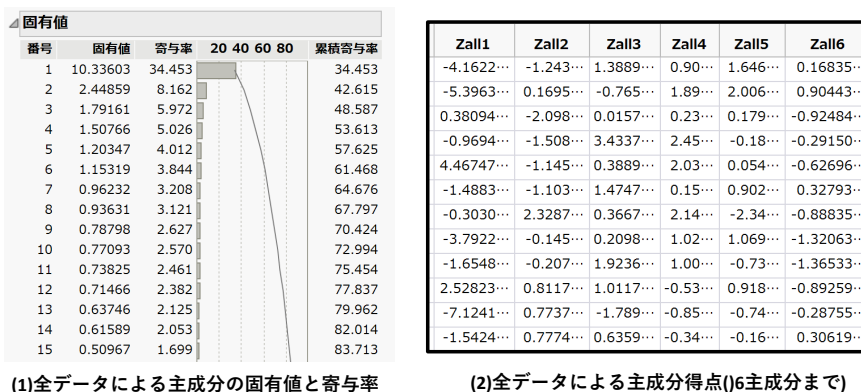


図3 結果系と原因系の全データによる固有値と主成分

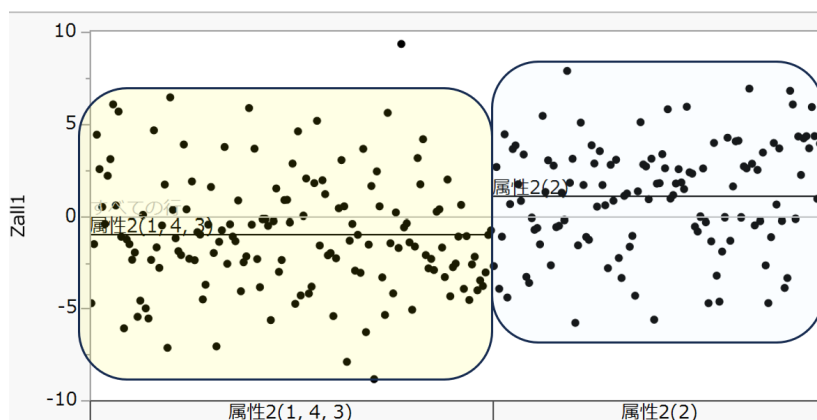


図4 属性2(この属性は1,2,3,4の4分類)で層別
→4分類を層S1[1,4,3]と層S2[2]の2層に層別

4. 両側因果分析における群構成

群構成とは相関の強い項目をまとめて群とすることである。合理的な群構成とは以下の性質を持つものである。

* 群内の項目の相関が強い。

主成分にすることで要約ができかつ独立になる。

* 群間の項目の相関は弱い。

各群で求めた主成分の間の相関は弱い。

ただし群には固有技術的な意味が重要で、単に相関だけで群構成をしてはならない。本来同じ群に属するものは固有技術的な意味が明快でかつ互いの相関が強いものである。他方相関が弱く同じ群の他のものからある程度は離れていても意味的に結びつきが強ければ同じ群にまとめて良い。しかし大きく離れた場合には再度検討し、場合によってはその項目は別の群に所属させる必要がある場合もある。

4.1 群構成の必要性

結果系項目の場合は極端に多数になることはないが、原因系項目の場合はかなり多数になる場合が多い。したがって本研究では原因系項目に関する群構成を議論するが、結果系の項目が極端に多数になった場合には多数の原因系項目に対するアプローチを同様に用いればよい。

質問紙調査においては調査目的を全うするために不完備な構造の質問構成を回避しなければならない。そして、質問紙調査は「一期一会」(同じ相手に対しては一度だけの機会)であるために後で足りない分を追加で聞くということとはできない。このため重要なことは以下の2点である。

* 盲点を作らないこと。

* 聞き漏らしのないこと。

盲点（空隙）を作らないためには質問項目の構造において重複を避けることはできない。そして聞き漏らしをしないためには似た質問を多用することになる。このような事情から近年の質問紙調査においては質問数が増え、質問間の相関は高くなる。

しかしながらマクロ的に見ると多数の質問項目は次に述べるような群（質問の集まりのこと）を構成している。すなわち群の中の項目は相関が高く、群の間の項目同士（異なる群の項目同士）の相関は低い。この構造は主成分分析を行うことで把握ができる。しかしそれはデータを採った事後のことで、事前には予想するしかない。事前に行う群構成はその時点で持っている「固有技術」で行うことになる。事前の段階ではアルファベットで構成し、事後はギリシア文字で構成する。事前の群は調査を行うために必要で、事後の群は調査結果に基づいて再構成したもの（構成し直したもの）である。この例を図5に例を示している。事前の群はA群、B群、C群、D群、E群、F群の6群構成で、事後は α 群、 β 群、 γ 群の3群構成である。

4.2 群構成の検討

質問項目の多いデータの分析では項目に関して群を構成することが必須である。この場合の「項目に関する群」とは、多数の質問におけるある領域に関して多角的(多面的)に質問をした項目の集合のことである。同じ領域に関して多角的に質問をするのは盲点を作らないことや聞き損ないを防ぐには重要なことである。何故ならば、同じ回答者に再度聞くことはできないからである。このために回答者に過度の負担をかけない範囲でいろいろと質問することは重要である。多数の項目を聞いて不要ならば無視すればよいが、聞き損ないは事後にカバーすることはできない。同じ領域に関して多角的に質問をするために質問項目の間には相関が生じることは避けられない。同じ領域に関する多数の質問項目のデータは互いに相関はあるが主成分で要約することができる。

群内の項目間は強い相関を有するが、群の間の相関は弱い。もし異なる群の間の相関が高い場合にはそれらは群を合併する必要がある。その場合併合した複数の群に対して新たな名称を付けなければならない。群内の主成分は互いに独立で相関は0であるが、群間の主成分に関する相関は0ではないが弱い値にならなければならない。良い群構成とは、群内は相関が強く群間は相関が弱いという構成である。したがって、もし群間の主成分に関する相関が強い値になった場合には群の併合を行う必要がある。なお、群構成の評価・検討については群ごとの主成分を説明変数とした重回帰分析において全数選択のもとでのVIFを用いるとよい。

図5は主成分負荷量図上に現れた結果を踏まえた群の再構成である。この図が示すように事前のアルファベットの6群は事後にギリシア文字の3群に再構成されている。

※(A群,B群,C群)→ α 群, E群→ β 群, (D群,F群)→ γ 群

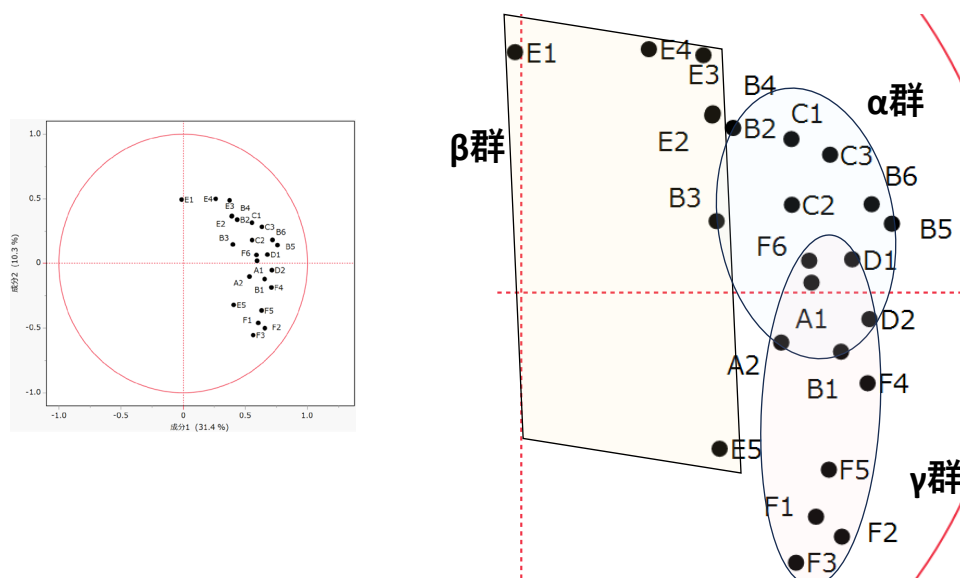


図5 群構成の例(事前の群はアルファベットで事後の群はギリシア文字)

5. 仮想実験

仮想実験のデータは間隔尺度であることが望ましいことは理論的に明らかである。それはコンジョイントカード（本研究では実験カードと呼ぶ）を点数評価することが有効である。しかし、直接的な点数評価は回答者の負荷が大きくかつ得られたデータの精度に疑問が生じる場合が多いために階差按分法^{[7][16]}が提案された。その後この方法に調整を加えた調整型階差按分法^[18]が提案された。これは階差按分法のデータをそのまま用いるのではなく、データが得られたら一呼吸置いて計算された評価点を回答者自身が見直して調整を加えて機会を与えて納得のいく点数評価データにするという方法である。これは順序尺度のデータを間隔尺度に近付ける方法である。したがって、この方法で得られたデータを準間隔尺度データ(本来の間隔尺度データに準ずるレベルのデータ)と呼ぶことができる。

質問紙調査はアンケート調査と呼ばれることが多い。そして、昨今はこれがWeb調査で容易に行えることからその利用数(実施数)はかなり増えている。丁寧な調査を行えば現状をつぶさに把握することができる。しかし、このような調査では「今後どうすべきか」についてはきちんと把握をしたり具体的な情報をとることができない。

形の上では「これからは何が欲しいですか?」、「これからはどのようなことを望みますか?」等の質問の言語情報により多少の情報をとることは可能である。しかし、このような調査データの場合には回答者の漠然としたイメージや今後の大局的な方向性についてはつかめても具体的な対策(何をどうする)を立てることはできない。

今後の対策を立てることを意識した場合においては、これまでコンジョイント分析がよく用いられてきた。その本質は条件の組合せを可視化したもの(プロフィールカードほか)を用いて、提示した条件の組合せに対する評価データをとって分析を行うというアプローチである。

この場合の評価とは、刺激を与えて（条件の組合せを提示して）反応（つまり評価）を観測するということを意味するので、これは実験そのものである。しかしながら、実物を用いずに仮想的な条件を可視化したもの（カードや映像ほか）を用意して回答者に評価してもらう方式なので実物を用いるリアル実験と区別してバーチャル実験（仮想実験）と本研究では呼ぶ。そして、評価結果は質問紙に記入する形式なので質問紙実験とも呼ぶ。

これまでの多くのコンジョイント分析というものは以下の特徴を持っており、これらは限界を意味している。

- * 主効果のみで交互作用を扱うことは例外的である。
- * 因子は全て質的因子として扱われているために本来量的因子であるものも質的因子として扱われる。
- * このため2次模型を扱うことはない。量的因子で水準幅が広い場合は2次項が効く場合が少なくない。
- * 本質的に量的因子であっても分散分析や数量化I類で質的な分析がなされている。
- * 上記のような特徴のために実験水準の間の解を扱うことはできない。

※量的因子を量的に扱い、数理計画法で多様な定式化のもとで最適化を行えば、しばしば水準間の解が得られるが、それを無視していることになる。

本研究は本来の実験（DOE:実験計画法）という観点に立って「階差按分評価法」とその応用方法を提案する。

5.1 問題解決タイプの研究における3ステージ

問題解決タイプの実務事例ではそのアプローチが以下に示す3つのステージ（S1, S2, S3）で構成される。

S1：実態はどうなっていて何に手を打つべきか。

S2：打つべき対策は具体的にどういうものが良いか。

S3：対策の効果はあるのか。

S1（第1ステージ）はこれ単独でも重要であり、これだけで意義のある研究ということができ、この種の発表は極めて多数存在する。しかし、実務ではその先の成果までが要求される。S2（第2ステージ）は手を打つべき対象にどういう対策を打ったらよいかを明らかにするものである。しかし、S1の研究の最後に考察の後で以下のコメントが示されることが多い。

* こういうような手を打つとよい。

* こういうような手を打つ必要がある。

ところが、これは対策の方向性を示唆するものであるために具体性はない。例外的に具体性のある対策が示される場合もあるが、それは頭の中で考えた仮説である。

S2（第2ステージ）では実験に基づいて具体的な対策を設計する。対策というものは数理的に表現すると以下の2つのものの組合せ（以後は条件と呼ぶ）である。

* 因子（何を）：いわゆる変数に当たるものである。

* 水準（どういう状態）：因子の具体的な状態である。

上記のものは実験（条件の組合せを用意して反応を調べること）によって明らかになる。この種の問題解決のための実験は可視化して用意された案（条件：因子と水準の組合せ（カードで明示））を人間が評価するという形の実験であるので仮想実験と呼び、実験に用いるカードを実験カードと呼ぶ。なお、S2だけでも研究として成立する。

しかし、実務での要求はシビアで、対策を実施してその成果があがらなければ認められない。このためにS3（第3ステージ）が必要になる。S2で明らかになった因子と水準の組合せを実施するためにはスケジューリングとともに様々な準備が必要になる。そして実施に当たっては進捗管理をしなければならない。最後に得られた効果を確認する。もともと対策は焦点を絞っているのだから、実行計画の段階で掲げた狙いに対してどこまでの成果があがったのかを明らかにする。

以上のことを整理すると次のようになる。調査に基づく研究にはS1（問題点の把握：何が問題か？を明示する）とS2（対策の提示：打つべき手は何か？をする明示する）とS3（対策の実施と効果の確認をする）がある。

【S1】（問題点の把握：何が問題か？を明示する）

調査で実体を把握した上で手を打つべき対象を明らかにする。※重点指向すること。

* 因果関係を明らかにし手を打つ対象を選択する。

【S2】（対策の提示：打つべき手は何か？を明示する）

具体的にどのような手を打ったらよいのかを明らかにする。※重点指向すること。

* 因子の結果への影響を把握して対策を決める。

【S3】（効果の確認：対策は効果があったのか？）

対策を実施して狙った効果が得られたかどうかを明らかにする。

* 対策がしっかりと行われ設計時点で狙った効果があったのかを確認する。※整合に注意する。

【S1】に対しては「両側因果分析」が有効である。そして本研究は【S2】に焦点を合わせている。【S3】については別の機会に報告を行う予定である。

5.2 重点指向に基づく対策（因子と水準）

資源（人、モノ、金、時間）は有限であるため問題解決においては重要なものに集中投入することが重要である。

* 問題となったものの全てに手を打つことはできない。

問題として取り組むものを絞り込む（厳選する）。

* 原因であるものの全てに手を打つことはできない。

原因の中で手を打つものを絞り込む（厳選する）。

すなわち、問題となったものに対して1つの対策で全部に効果を上げること（一対策で全てを賄うこと）はできない。問題となったものの中で特に重要なものに焦点を合わせて対策を打つことが現実的なアプローチである。

対策は数理的に見たら因子と水準の組合せである。

因子：どういうものに対して

水準：どういう条件にする

これを科学的に明らかにするためには仮想実験が必要である。実験においては効果があると予想される因子と水準の組合せを試して数理模型を作り、これを用いて最適化することである。仮想実験は人間の評価に基づく実験である。因子と水準の組合せを提示して評価をしてもらう点に特徴がある。

5.3 仮想実験のための実験条件の可視化の工夫

仮想実験で用いるものの典型はカードを用いた評価であるが、この場合は工夫が極めて重要である。

因子と水準は文字で表現ができるが、文字表現による実験カードは表であるために回答者が理解することが困難である。カードは視覚情報を扱うことができるので様々な工夫を施す必要がある。基本的には「見て分かること」、あるいは「一目瞭然」が重要である。このために以下のものが用いられる。

- * 絵・イラスト（忠実に描写）
- * デフォルメ（特徴を強調した描写）
- * 写真
- * 図・図面（数字や説明あり）
- * バーチャート（スケジュール表）

5.4 説明変数と前提条件

仮想実験においては以下に示す2つのものを明確に分けて扱わなければならない。

[1] 因子（説明変数）：手を打つ対象

[2] 回答者属性（前提条件）：層別をする対象

仮想実験の分析は基本的には回答者一人ひとりに関して実行することができる。しかし多くの場合は集団として扱い、集団全体の平均値を用いて分析を実行する。もし集団の中に層があり、この場合層の間にはっきりとした違いがある場合には層別分析が重要になる。この場合に層別をしないと分析を誤解する。逆に層間にはっきりとした違いがない場合には違いの無い複数の層を一緒にして分析の方がデータ数が多くなるので有効である。特にもともと全体のデータ数が少ない場合には複数の層を一緒にとするとデータ数が何倍にも増えて有利になる。

5.5 4つの尺度とデータの採り方の工夫

データ分析においてデータの尺度(タイプ)がどのようなものであるのかで分析のレベルに大きな違いを生じる。データの尺度には以下の4種類のものがある。

① 名義尺度, ② 順序尺度, ③ 間隔尺度, ④ 絶対尺度

上記のうちでもっとも高いレベルの尺度は絶対尺度であるが, これは特殊なもので絶対尺度データを得ることは容易ではない。したがってその次のレベルの間隔尺度データが好ましい。工学系のデータの多くは間隔尺度データである。しかし人間が評価を行う場合には間隔尺度データを得ることは難しく, 順序尺度データを後いることが多い。そして, 順序尺度データを間隔尺度データと見なして使用する場合が少なくない。

5.6 対象を相対的に順位付け評価

多くの場合に用いられる方法は良さの順番に順位付けを行って得られた順位に基づいて数値を与える方法である。例えば評価対象が10の場合には以下の様になる。

1位:10, 2位:9, 3位:8, …… , 8位:3, 9位:2, 10位:1

上記のような場合には評価には(優劣に関しては)信頼が置けるが, 点数に関しては疑問が残る。いずれも順位間の差に関して等間隔であることを前提にしていることが問題である。そして, 比較評価では絶対評価が分からない。例えば第1位であっても100点満点で90点の場合もあれば40点の場合もあるがその区別はつかない。

5.7 グレード評価

次に示すグレード評価は間隔尺度を意識したものである。この場合, [良い/悪い]や[良い/どちらとも言えない/悪い]では荒すぎる。したがって, 多くの場合は以下の5段階評価が用いられる。そしてグレードの数字を間隔尺度データとして用いることが多い。

1:たいへん悪い, 2:悪い, 3:どちらとも言えない

4:良い, 5:たいへんよい

【注】悪いが不満足, 良いが満足となる場合も多い。

グレード評価は順序尺度と間隔尺度の中間のものである。

[1]工夫した順位付けはやり易くかつ信頼性が高い。

[2]その結果の階差(隣り合ったものの差)に対して以下のグレード評価で相対的な間隔尺度に近付ける。

階差⇒0:ない, 1:かなり小, 2:小, 3:中, 4:大, 5:かなり大

[3]さらに最上位(第1位)と最下位に慎重な点数評価(100点満点のもとで)をしたうえで全体の点数を計算(按分)で明らかにする。

[4]その上で, 評価者が最終的に計算値を見直して必要ならば点数の調整を行うことで精度を高める。

この方法は評価者への負担が少なく比較的やり易くかつ信頼がおけるものである。

なお、最後の調整のためには計算値を示す必要があるためにコンピュータのアシストが必要となるため状況によっては見直しは省いてもよい。これまでの実施経験では最後の調整をしない人がいることと、調整があった場合は特別に大きなものでないことが分かっている。故に調整をした方がより精度の高いデータが得られるが、調整のためにはコンピュータの準備と少し手間がかかるのでこれを省くことも選択肢である。故に、可能なら最後の調整を加えることが望ましいという表現に留めておく。

5.8 調整型階差按分法の背景

最終調整までを行うアプローチの場合には次のように考えることができる。いきなり多数のカードの点数評価は難しいが自分の考えに比較的整合したまづまづの評価点数を見せられてそれを調整するのはやり易くかつ信頼の置けるデータが得られる。

- * いきなり多数のカードに対して精密な評価を下すことは難しい。
- * しかし順序を付けることであればなんとかなる。
- * とは言え順序を付ける場合もカードが多くなった場合には一度に順序を精密に付けることはできない
- * 3段階の順序付けならば合理的である。
- * 最上位と最下位のカードに限定すればていねいな点数評価は可能である。
- * 階差（順位の隣り合ったものの間の差）ならば評価がし易い。
- * この場合、差を点数評価ではなく程度を評価する方が好ましい。
- * 最上位の点と最下位の点があるので、階差の程度を数値と見なして全体を按分すれば比較的納得のいく点数評価を示すことができる。
- * この計算した評価点数を提示した上で最後の吟味を行って必要ならば修正をする機会を与えれば正確な点数表化を得る可能性が高い。

5.9 調整型階差按分法

本研究は「順位付け」と「階差のグレード付け」をブレンドした方法として「階差按分法」、そしてそれを更に精度を高めるためにグレードアップしたものが「調整型階差按分法」を提案している。7.2節で示した内容を以下に詳しく解説する。

* 最初の順位付けは工夫した方法をアドバイスすることで回答者にとってやり易くなり負担が少なくかつ信頼の置けるデータが獲得できる

* 階差を点数評価するのは難しいのでグレード付け（程度づけ）にすることで簡素化しかつ信頼性を高める

[1]順位付け

順位を3ステップで付ける。

- <1>3グループ（好ましいG, 好ましくないG, 他G）に構成
- <2>各グループ内でしっかりと順位を付ける

<3>上下のグループ間の下位と上位の順位を調整する。

【注】最後に調整を入れて精度を高める。

[2]階差のグレード付け

順位が隣り合ったものの間の差をグレード付けする。その際に同順位（差はない）も許容する。

階差⇒0:ない, 1:かなり小, 2:小, 3:中, 4:大, 5:かなり大

[3]最上位と最下位の点数評価

2つのものだけに関しては慎重に点数評価を行う。

[4]点数調整（計算点数の調整）

階差按分法で計算された点数を見て必要ならば点数調整を行う。そのまま問題が無ければ調整はしない。

この最後の調整は次のように見ることができる。

*多数枚のカードに対してそれぞれに点数評価をすることは多くの人にとって困難なことである。

*しかし各カードの点数が本人の考えに沿ったまづまづのレベルで示されればそれを調整することは比較的容易である。しかも、その場合の調整された点数評価についてはかなり信頼がおける。

各カードが本人の考えに沿った基本的なレベルの点数は以下の様にして得ることができる。

*工夫をすることで本人自身がそのベースを作る。

最終的に点数評価ができることは以下のことを意味する。

*カードの全体に順序を付けることには困難さはない。

*隣り合った順序のカードの差に関して点数評価は困難であるが差のグレード評価ならば可能である。

*最上位と最下位の2つのカードに限り回答者に対して点数評価することにはあまり困難さはない。

*以上の情報をもとに階差を按分し各カードの点数評価を計算で求める。※ここまでが階差按分法である。

※この場合、全体の差は最上位の点数と最下位の点数の差で、これをベースにして階差をグレード評価したものを数値と見なして按分を行う。按分された差に関する点数を用いて最下位の点数から積み上げれば最上位の点数までの各カードの点数を計算で求めることができる。

以上で求めた計算値は本人の考えをベースにしているので本人の考えに沿って点数評価といえる。

★最上位と最下位以外の全てのカードの点数が用意されたので、改めてその点数を検討してもし必要であれば調整を行うことで精度を高める

。この調整までを行ったものが「調整型階差按分法」である。

5.10 これまで紹介したアプローチの整理

仮想実験のデータは被験者(回答者)による評価である。多数のカードに対する点数評価は回答者に負担をかけるとともにデータの信頼性に疑問が残る場合が多い。このためにこれまで順位尺度データで扱うことが多かった。このデータを「順序ロジット分析」することは難しいとともに解釈も難しくかつ応用性に乏しい。このため順位を間隔尺度と見なし分析をする場合が少なくない。しかしこのようなアプローチは以下の問題を有している。

* 順位間の差が分からない。

* 実際の位置が分からない。

例えば 100 点満点のどの位置かが不明である。第 1 位といっても 98 点(かなり良いが限界に近い)かもしれないし 60 点(第 1 がこの点では大問題)かもしれない。他の順位のものも位置が不明である。

* 積項(交互作用)は扱えても 2 次項は扱えない。

* 解は実験水準の組合せからしか選択ができない。

これらの問題をクリアするためには間隔尺度データにすべきである。しかし、いきなり評点で評価(例えば 100 点満点での評価とか 10 点満点での評価)することは回答者にとって容易ではないし得られたデータはあまり信用が置けない。

本研究はこのための新しい方法として調整型階差按分法を提案しているが、以下にそのアプローチを確認する。

[1] まずは工夫して納得のいく順位を付ける。

- ・ ザックリと 3 グループ (3G) に分かる。
- ・ 各 G ごとにていねいに順位を付ける。
- ・ 隣り合った G の隣接した順位のもの精査をする。
- ・ 必要ならば隣接した順位のもの入替をする。

[2] 次に階差(順位間の差)をグレードで評価する。

[3] その上で第 1 位と最下位に対して点数評価をする。

[4] コンピュータで階差を按分して全てのものの点数を計算する。

[5] 回答者は計算値を確認して必要ならば点数を調整して納得のいく点数評価を行う。

上記のうちの [4] と [5] を行うためにはコンピュータの準備が必要であることとこれらのために時間がかかること及び回答者に負担がかかることからときにはパスしてもよい。ただし信頼が置けてかつ精度の良いデータを得るためには [4] と [5] は重要である。つまり [4] と [5] は must のステップではないが better のステップなので可能ならば行うことが望ましい。

有効な対策を具体的に見出すためには仮想実験が有用ある。しかしそれが高度に有用であるためにはデータが間隔尺度かそれに準じたものでなければならない。しかし、回答者にあまり負担をかけずに精度の高い間隔尺データを採ることは容易ではない。このとき階差按分法は有用である。本研究はこれに手を加えた調整型階差按分法を提案した。これにより回答者にあまり負担をかけずに精度の高い準間隔尺データを採ることを可能にした。

5.11 有限範囲のもとで評価が限界に近づいた場合の問題

ところで、点数評価には範囲が有限に定まっている(上下に限界がある)点に注意しなければならない。例えば 100 点満点(0~100)での評価の場合に上下の限界に近い値が多くなった場合にはデータをそのまま扱う分析は微妙になる。すなわち、予測値が範囲の外に出る(負の値や 100 を超える値になる)ことが発生するのである。この場合はロジット変換を用いるとよい。ただし、ロジット変換を行うために評価 y (0~100) を 0~1.0 にする必要があるので 100 で割ったもの ($y/100$) を用いる。

$$Z = \log\left(\frac{y/100}{1-y/100}\right) \quad (1)$$

ロジット変換後の分析は回帰分析なのでロジット回帰分析となる。そして、解が得られたら逆ロジット変換でもとの変数に戻せばよい。この場合は(0~1.0)の世界に戻しているの、100 倍して評価 y (0~100) に戻す。

$$y = \left(\frac{\exp(Z)}{1+\exp(Z)}\right) \times 100 \quad (2)$$

しかし、かなり限界に近づいた場合にはロジット変換による方法でも限界で、もはや対応することができない。これはサチュレートした(飽和した、限界にきた)と考えなければならない。このような場合には、評価それ自体を変更する必要がある。すなわち、評価の観点を変えることである。このためには対象のことをよく考えて意味のある新しい評価の観点を用意しなければならない。この新しい評価の視点については事例によって大きく異なるので、ここでは一般的なアプローチのヒントになる例を紹介しておく。これに関する分かり易いものとして「事故の低減の取組み」の場合の例を用いて説明すると以下の様になる。

A:[アクシデント:accident]: 本物の事故

死亡事故数 (最悪の事故の件数)

重大事故数 (深刻な事故の件数)

軽微事故数 (軽いけれども事故)

B:[インシデント:incident]: 事故予備群(事故一步手前)

ヒヤリハット数 (運よく起きなかった事故の件数)

C:[プレディクター:predictor]: 事故の予兆(数歩手前)

装備不備数(事故になる可能性の直接要因)

身嗜みの悪さ回数(事故になる可能性の近因の件数)

緊張感の無さ回数(事故になる可能性の遠因の件数)

なお、新しい観点のもとでの評価に関してはすでに述べた様に「階差按分評価」を適用する。

6. 仮想実験における層別

6.1 層別に関する仮想実験と調査の本質的な相違

層別に関する仮想実験と調査の本質的な相違は以下の2点である

* 独立変数間の相関

調査：強い相関→後で群の再構成が必要になる。

実験：ほぼ独立→後で群の群構成は不必要である。

* 結果系変数（項目、プロフィールカード）の個数

調査：用意した結果項目の数 →一つの場合が多い。

実験：プロフィールカードの数→かなり多い。

調査と実験の違いは項目に関して群の再構成を行う必要はないという点である。仮想実験は調査とは異なり最適計画に基づいて変数(実験因子)に関しては独立性が確保されているために変数をまとめるという群構成を行う必要はないのである。

一方、似た回答者をまとめるという層別は重要で、この本質について実験の場合と調査の場合は共に必要とする。しかし、実験においては原因系は実験計画(最適計画)のもとで全員同じなので結果系のデータのみで層別を検討することになる。なお、仮想実験の場合は複数枚のプロフィールカード(多くの場合10枚前後)があるのでこれらのデータを用いて層別の吟味を行う。これについては紙数の都合によりアプローチの本質だけを以下に示し具体例は割愛する。

仮想実験は一人でも分析が可能であるが、似た評価をする回答者は層としてまとめて扱う方がよい。そのことにより同質のデータ数が増えて分析の精度が向上するため層を形成する意味は大きい。しかし大きく異なる評価をする回答者が混在すると、分析を誤ってしまいかねない。また、回答数が少ないデータにおいて不要な層別をすると分析の精度が落ちてしまうこともあり得る。よって、回答者属性や回答傾向に基づく層別の要不要の検討は重要である。

6.2 実験の回答者に関する層別の検討アプローチ

本研究では、層別を以下のステップで行う。

[Setp1]似ているかどうかの検討は、全カード(例えば12枚のカード)に対する回答者全員のデータ(12枚のカードの場合は12変数)による主成分を用いて行う。

[Step2]主に上位の主成分(第1主成分, 第2主成分)を用いて、以下の様に層別の候補を探す。

[A] 因子負荷量図上で明確に塊が現れた場合

→塊を構成している属性を候補とする。

[B] 因子負荷量図上で明確に塊が現れない場合

→主成分に対して属性を説明変数とした変数選択の回帰分析で候補を見つける。

[Step3]属性を用いて分類木(質的な場合は決定木)を行い、有用な情報を手に入れる。

[Step4]候補属性に対して、主成分を用いた判別分析でどの程度判別するのかを吟味する。主成分は上位の主成分から順次増やし、誤判別率の変化する様子を見て以下を判断する。

[1]誤判別率が33%前後以下ならば候補の属性で層別する。

[2]誤判別率が33%を越えても、40%前後以下なら層別をした分析結果を見て判断する。

以上の情報に基づいて層別に関する総合的な判断を行う。なお、層別が決まったら原則として層ごとに設計を行うことになるが、複数の層を用いて連合設計を行うという高度なアプローチの選択肢もある。このアプローチについては別の機会に報告する。

7. おわりに

質問紙調査（アンケート調査）は現状をつぶさに把握することができるが、「今後どうすべきか」についてはきちんと把握をしたりあるいはそれに関する具体的な情報をとることができない。このためには調査ではなく実験が必要である。これまでコンジョイント分析がよく用いられてきた。その本質は条件の組合せを可視化したもの（プロフィールカードほか）を用いて、提示した条件の組合せの評価データをとって分析を行うというアプローチである。しかし、本来の実験の観点からするとコンジョイント分析には幾つかの克服すべき点がある。本研究はそれらの克服すべき点を明らかにして上で、「階差按分評価法」を提案した。

新しい評価法を提案するために代表的な3つの評価法を整理し、それぞれの長所・短所を比較し、その上で3つの方法を組合わせた（ブレンドした）方法として「階差按分評価法」を構成した。

しかし、仮想実験は人が評価を行うために様々な制約がある。それらを明らかにしたうえで構造模型表の利用と最適計画の活用方法を説明した。本来の実験の観点からは積項・交互作用と2次項を安易に考えて無視してはならないこと、そしてそれらを取り上げた上で実験サイズを最適計画で縮小すること、更には実験サイズの縮小にともなう直交性の劣化に対してVIFを踏まえて（全数選択のもとで把握して）歯止めをかける方法を示した。

最後に評価が「限界に近づいた場合」と「かなり限界に近づいた場合」に行うべきアプローチについても論じた。前者のためにはロジット回帰を用い、後者のためには評価の観点の変更（概念的なレベルアップ）を図るということを明らかにした。

実務事例において成果をあげるには質問紙調査（両側因果分析）と仮想実験の2つをセットで行うことが望ましい。本研究はその際に回答者の層別と項目の群分けが重要であることを明らかにした。そして、調査データの分析においては回答者の層別と項目の群構成のアプローチを提案し、実験データの分析に関しては回答者の層別のアプローチを提案した。

提案するアプローチをいろいろなタイプの実務事例（顧客満足、従業員満足、働き方改革ほか）に適用してその有効性を明らかにすることが今後の課題である。

参考文献

[1] 池本浩幸, 山岡俊樹 (2010): “完全プロファイル型コンジョイント分析の効果的活用”。

- 日本感性工学会論文誌, 9(2), 215-225.
- [2] 糸谷圭介, 糸谷素子, 原良昭, & 加藤順一. (2015). リハビリテーション病院入院患者における在宅復帰のための要因の検討 -決定木分析を用いて. ヘルスプロモーション理学療法研究, 4(4), 171-175.
 - [3] 岡本眞一 (1999): 「コンジョイント分析 SPSS によるマーケティングリサーチ」, ナカニシヤ出版
 - [4] 川崎昌, 高橋武則(2022):”データサイエンスの教育における座学とアクティブラーニング”, JSQC 第 130 回研究発表会発表要旨集, 9-12.
 - [5] 川崎昌, 高橋武則, 小川昭(2022):” データサイエンスに基づく積項と 2 次項を対象とした質問紙実験”, JSQC 第 50 回年次大会研究発表要旨集, pp.155-158.
 - [6] 川崎昌,高橋武則 (2022):“実践的な質問紙実験”,Discovery Summit Japan 2022 論文集. SAS Institute Japan 株式会社 JMP ジャパン事業部, 15-28.
 - [7] 川崎昌,高橋武則,小川昭 (2023):“階差按分評価法を用いた仮想実験の試行”,JSQC 第 131 回研究発表会発表要旨集, 121-124.
 - [8] 川崎昌,高橋武則,小川昭 (2023):“仮想実験のデータ収集方法に関する検討”,JSQC 第 132 回研究発表会発表要旨集,49-52.
 - [9] 川崎昌,高橋武則,小川昭 (2023):“仮想実験による大学生の就業環境意識分析”,JSQC 第 133 回研究発表会発表要旨集,14-17.
 - [10] 川崎昌,高橋武則,小川昭 (2023):“仮想実験における回答者の層別に基づく分析”,JSQC 第 53 回年次大会発表要旨集,29-32.
 - [11] 菅民郎(2013): 「Excel で学ぶ多変量解析入門」, ホーム社.
 - [12] 澤島秀成, 杉山陽二, & 山岡俊樹. (2005). ユーザ属性と製品評価の関係分析における決定木の有用性. デザイン学研究, 52(4), 15-24.
 - [13] 高橋武則(2020):“説明変数間の相関が高い場合の両側因果分析とその反転分析”, JSQC第50回年次大会研究発表要旨集, 207-210,
 - [14] 高橋武則 (2022):“仮想実験としての質問紙実験”, JSQC 第 52 回年次大会発表要旨集, 133-136
 - [15] 高橋武則(2022):”選抜型両側因果分析における結果系項目との相関に基づく原因系項目の選抜”, JSQC第128回研究発表会発表要旨集, 95-98.
 - [16] 高橋武則 (2023):” 質問紙実験におけるプロフィールカードの量的評価のための階差按分法”, SQC 第 131 回研究発表会発表要旨集,pp. 117-120.
 - [17] 高橋武則(2023):”質問紙実験におけるプロフィールカードの量的評価のための階差按分法”, JSQC 第 131 回研究発表会発表要旨集, 117-120.
 - [18] 高橋武則(2023):” 調整型階差按分法による仮想実験”, JSQC 第 132 回研究発表会発表要旨集, 45-48.
 - [19] 高橋武則(2023):”アンケート調査と仮想実験”, JSQC 第 133 回研究発表会発表要旨集,

45-48.

- [20] 高橋武則(2023):”両側因果分析における回答者の層別と質問項目の群構成”, JSQC第53回年次大会研究発表要旨集, 107-110.
- [21] 高橋武則, 川崎昌 (2019): 「アンケートによる調査と仮想実験」, 日科技連出版社.
- [22] 生田目崇 (2017): 「マーケティングのための統計分析」, オーム社.
- [23] 鷺尾泰俊 (2001): 「実験の計画と解析」, 岩波書店.

最適計画による仮想実験データの層別分析

Stratified Analysis of Virtual Experimental Data by Optimal Design

川崎 昌¹ 高橋 武則²

Sho KAWASAKI Takenori TAKAHASHI

【要旨】

人を対象とする調査や実験において、回答者の属性や回答傾向に基づく層別の要不要の検討は重要である。大きく異なる評価をする回答者が混在すると、分析を誤ってしまいかねない。一方で回答数が少ないデータにおいて不要な層別をすると分析の精度が落ちてしまうこともあり得る。

本研究では、企業からの依頼に基づき計画した大学生および大学院生を対象とする労働環境に関する仮想実験の事例を用い、最適計画を立て、階差按分評価法により取得した仮想実験データの層別の検討に統計的な手法を活用した。その後、①将来目標が明確な学部生、②将来目標が不明確な学部生、③院生の3層に分けて分析・考察を行い、各層の特徴を明らかにした。

①と②の大学の学部生と③院生の層には、特に残業や休日に関して、その特徴に明確な違いが確認された。本実験の③院生の層には社会人経験者が多く含まれていることから、実務経験により労働環境の希望に変化があることが示唆された。

【キーワード】 仮想実験、最適計画、階差按分評価法、層別分析

Abstract

In surveys and experiments involving human subjects, it is crucial to determine whether stratification is necessary based on respondent attributes and response tendencies. Mixing respondents with significantly different evaluations can lead to inaccuracies in the analysis. Conversely, unnecessary stratification of data with a small number of responses may compromise the overall accuracy of the analysis.

In this study, we conducted a case study involving a virtual experiment on the working environment for undergraduate and graduate students, planned in response to

¹ 川崎 昌 (Sho KAWASAKI) 桜美林大学 E-mail: kawasaki_s@obirin.ac.jp

² 高橋 武則 (Takenori TAKAHASHI) 統計数理研究所

a company's request. We developed an optimal plan and employed statistical methods to examine the stratification of the virtual experiment data obtained through the methods to prorated differences. The data were then separately analyzed and discussed for three strata: (1) undergraduate students with clear future goals, (2) undergraduate students with unclear future goals, and (3) graduate students. This approach allowed us to clarify the characteristics of each stratum.

A clear distinction in characteristics was observed between the groups of university undergraduates in (1) and (2) and the group of graduate students in (3), particularly concerning overtime work and holidays. Notably, the stratum of (3) graduate students in this experiment encompasses a significant number who have prior work experience, suggesting a shift in their working environment preferences based on their professional background.

Keywords: virtual experiments, optimal design, evaluation methods to prorated differences, stratified analysis

1. はじめに

仮想実験^{[1],[2]}は一人でも分析が可能であるが、似た評価をする回答者は層としてまとめて扱うほうがよい。それにより分析の精度が向上するため層が持つ意味は大きい。しかし大きく異なる評価をする回答者が混在すると、分析を誤ってしまいかねない。また、回答数が少ないデータにおいて不要な層別をすると分析の精度が落ちてしまうこともあり得る。よって、回答者の属性や回答傾向に基づく層別の要不要の検討は重要である^[3]。

層別を行うためには、実験の準備段階で回答者の属性を把握するためのフェイスシート項目を用意しておく必要がある^[4]。そこで事前に属性が把握できれば、それに基づき回答者の層別を検討することができる。そのほか統計的手法を活用して、実験データを分類する層の確認方法もある。そしてこれらに専門的な知見を加えて最終的に層を定義するという手法が、人や組織を対象とした調査や実験においては効果的である。

本研究の目的は、最適計画^[1]を立て、階差按分評価法^{[5],[6]}により取得した仮想実験データの層別について検討を行い、層別後の分析・考察に基づき各層の特徴を明らかにすることである。本研究で取り上げる事例は、企業からの依頼に基づき計画した、大学生および大学院生を対象とする労働環境に関する仮想実験である。

2. コンジョイント分析と仮想実験

人や組織に対し、仮想的な条件を示して行う実験は、これまでコンジョイント分析^{[7],[8]}と呼ばれている。従来からあるコンジョイント分析は、様々な分野で広く活用されている実験

形式のデータ収集に基づくデータの分析手法である。本研究では、敢えてそれを「質問紙実験」あるいは「仮想実験」と呼ぶ。その理由は次に示す8つの点において、従来のコンジョイント分析とは異なるからである。

- ① 直交計画ではなく最適計画を前提とする。
- ② 因子は原則として量的因子とする。
- ③ 積項（交互作用）と2次項を積極的に取り上げる。
- ④ 直交性は多少譲歩し、必要な項を採用する。
- ⑤ 解析模型表を作成しこれに基づき最適計画を立てる。
- ⑥ 変数選択の重回帰分析で模型化（モデリング）を行う。
- ⑦ 設計では数理計画法に基づく多目的最適化を行う。
- ⑧ 設計後に解の確認調査を行う。

また、コンジョイント分析や仮想実験におけるデータ取得でよく用いられる評価方法には、プロフィールカードを1) 順位評価をする、2) 直接得点評価する等がある。順位評価の場合には、回答データを順位尺度として扱う場合と連続尺度とみなして（順位を連続尺度に変換して）扱う方法がある。岡本^[7]はコンジョイント分析でのデータの収集方法と計測スケールを表1、表2のように整理している。このうち、A. 全概念法が最も利用しやすいとされる。

さらに、人を対象とした実験で最も注意しなければならないのは、データ収集時の回答者の負担軽減である。仮想実験において回答者の負担を軽減するため、高橋・川崎は、①積項・交互作用の有無が調べられる、②2次項の有無が調べられる、③実験回数を縮小する、④直交性を確保するため全数選択のもとで最大VIF; Variance Inflation Factor(分散拡大係数)を1.25以下に抑える、⑤3グループ(相対的に良い・普通・悪い)に分けやすい(3の倍数

表1 データの収集方法

| | |
|------------|---|
| A. 全概念法 | 1枚のカード上に全ての因子と水準を示し、具体的なコンセプトとして回答者に提示する方法。 |
| B. 二因子一覧表法 | 注目する2つの因子を取り上げて、それぞれの因子に関する複数の水準をマトリックスで提示する方法。 |
| C. 一対比較法 | 全概念法における具体的なコンセプトを2個1組として回答者に提示する方法。 |

表2 データ収集における計測スケール

| | |
|-----------|---|
| (1) 順位法 | プロフィールカードを好きな順に並べてもらう。 |
| (2) 評価法 | プロフィールカードに直接得点を付けてもらう。 |
| (3) 評価尺度法 | 各プロフィールカードについて、評価の程度を確認する選択肢(グレード)を用意し、回答を5段階評価等に置き換える。 |

の 9, 12, 15 の実験数が候補) を考慮した最適計画を立て、全概念法かつ順位法の仮想実験を実施した⁵⁾。しかし順位法では、順位を連続尺度に変換した場合、その評価値は等間隔となってしまう。そのため、より精度の高い実験データを取得するには直接得点を付ける評価法が望ましいが、この場合は回答者の負担が懸念された。

そこで本研究では、積項や 2 次項を扱うことができ、かつ実験サイズを縮小できる最適計画で作成したカードで階差按分評価法によりデータを取得し、それを連続尺度に変換して分析することとした。階差按分評価法によるデータ収集については、第 4 章に詳細を記述する。

3. 仮想実験事例

本研究の仮想実験事例は、京都で飲食チェーン店を営む S 社からの依頼により計画したものである。

3.1 因子と水準

S 社では人材不足を解消するための一施策として、週休 3 日制の勤務形態をスタートさせた。この施策が就職活動を控える大学生らにどのように評価されるかを確認したい、また学生らが希望する労働条件について具体的に知りたいという要望があり、それに対応するよう労働環境に関する仮想実験の因子と水準を用意した (表 3)。

3.2 前提条件と実験条件

S 社は飲食業であるが、就職先として飲食業以外を希望する学生や将来がまだ不明確な学生の意向も把握したいと考え、飲食業での就職を前提とせず「希望する職種で働くことができること」を本実験の前提条件とした。また、大学院生 (社会人経験がある人も含む) が調査対象となる可能性もあることから、因子や水準に設定した連休や報酬は「新卒の正社員として就業 1 年目の労働条件とすること」も前提条件として事前に示した。図 1 は、前提条件 (固定条件) と実験条件 (変更条件) をまとめ、仮想実験の対象者に対して回答方法の説明時に提示したものである。

表 3 事例の解析模型表

| No. | 因子 | 水準 | | |
|-----|--------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 休日 6日/月 (労働 7時間/日) | 休日 9日/月 (労働 8.5時間/日) | 休日 12日/月 (労働 10時間/日) |
| 1 | X1休日数 | 0回/月 | 2回/月 | 4回/月 |
| 2 | X2二連休 | 0時間/月 (+0円) | 30時間/月 (+5万円) | 60時間/月 (+10万円) |
| 3 | X3残業 | 月給24万 (賞与100万/年) | 月給30万 (賞与28万/年) | |
| 4 | X4給与賞与 | 5日(年2回) | 10日(年1回) | |
| 5 | X5長期連休 | | | |

| |
|---|
| <p>◆前提条件(固定条件):以下を前提条件とする。 大学(学部)を卒業後、新卒の正社員として就業1年目の労働環境・労働条件とする。 自分が希望する仕事(職種)に就けるものとする。</p> |
| <p>◆実験条件(変更条件):以下の5つの下線が付いた条件が変更条件となる。</p> <p>X1:休日数…1ヵ月当たりの休日の日数(それに伴い1日の労働時間が変わる)。 [6日(7時間労働)]または[9日(8.5時間労働)]または[12日(10時間労働)]</p> <p>X2:2連休日数…1ヵ月のうち2日連続して休める日の回数。 [月0回(連休は不要)]または[月2回]または[月4回]</p> <p>X3:残業…残業が発生すれば残業手当が基本給にプラスして支給される。 [0時間(+0円)]または[30時間(+5万円)]または[60時間(+10万円)]</p> <p>X4:給与賞与…給与と賞与の支給金額のバランス。(年収総額は同等) [月給24万(賞与100万/年)]または[月給30万(賞与28万/年)]</p> <p>X5:長期休暇…普段より長く休める休暇の取り方。 [5日(年2回)]または[10日(年1回)]</p> |

図 1 事例の前提条件(固定条件)と実験条件(変更条件)

3.3 最適計画

次に、最適計画のために、表 4 のように解析模型表を作成し、1 次項(主効果)、積項(交互作用)、2 次項の効果の状態を事前に予想した。その後、統計ソフトウェア JMP® 17 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)のカスタム計画を用い^[9]、解析模型表に基づき直交性の劣化を VIF により確認しながら実験サイズを縮小した最適計画を立てた(表 5)。VIF の確認方法は次節に示す。

コンピュータで計算され結果が示される最適計画において、因子・水準の組み合わせパターンは 1 通りではない。最適計画の組み合わせ条件の中には、例えば X1 の休日数が月 6 日(7 時間労働)、X2 の二連休が月 4 回(すなわち月 8 回の休日)のように矛盾が生じている場合もあるため注意したい。矛盾があれば事前に修正を行い、その際は再度直交性の劣化を VIF により確認するとよい。また、2 次の効果予想して 3 水準を用意した場合には、水準として用意した数値とまったく同じではなく、少し値が違う数字が計画の中に混じっていることがある。それは、直交性を保つためにコンピュータが計算した結果がそのまま表示されているためである。それらは、一番近い実際の水準の数値に修正することが望ましい。この修正を行ったときも念のため VIF により直交性の劣化を確認するとよい。

表 4 事例の解析模型表

| 因子 | 1次効果 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 |
|--------|------|----|----|----|----|----|
| X1休日数 | ○ | ○ | | ○ | | |
| X2二連休 | ○ | | ○ | | | |
| X3残業 | ○ | | | ○ | | |
| X4給与賞与 | ○ | | | | | |
| X5長期連休 | ○ | | | | | |

[凡例] ◎:強(必須) ○:中(採用が原則) △:弱(余裕ありなら採用) ×:無(無視)

表 5 最適計画

| No | カード | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 |
|----|-----|----|----|----|----|----|
| 1 | A | 6 | 0 | 0 | 24 | 10 |
| 2 | B | 6 | 0 | 60 | 30 | 5 |
| 3 | C | 6 | 2 | 30 | 24 | 10 |
| 4 | D | 6 | 2 | 0 | 30 | 5 |
| 5 | E | 9 | 0 | 30 | 24 | 5 |
| 6 | F | 9 | 2 | 0 | 30 | 10 |
| 7 | G | 9 | 4 | 60 | 24 | 10 |
| 8 | H | 12 | 0 | 0 | 24 | 10 |
| 9 | I | 12 | 0 | 60 | 30 | 10 |
| 10 | J | 12 | 2 | 60 | 24 | 5 |
| 11 | K | 12 | 4 | 0 | 24 | 5 |
| 12 | L | 12 | 4 | 30 | 30 | 10 |

3.4 VIF による直交性の劣化の確認

最適計画を立てた後、全数選択の重回帰分析により VIF を求める手順を以下に示す。

- イ) 各カードの [評価] 列を作成し、仮の適当な数字 (順位) を入力する。
- ロ) JMP メニューバーの分析からモデルのあてはめを選択し、Y (目的変数) に [評価]、説明変数に 1 次項、2 次項、積項 (交互作用) の予想される効果をすべて設定し、全数選択の重回帰分析を行う。
- ハ) 直交性の確認には VIF を用いる。VIF をチェックし、最大 VIF が 1.5 以下、できれば 1.25 以下であることを確認する。

その結果、本事例の場合、最大 VIF は 1.47 であることを確認した (図 2)。これは、直交 (全 VIF=1.0) そのものではないが準直交になっており、データ分析を行う上で問題はないと考えられる。

| パラメータ推定値 | | | | | | |
|-------------------|-----------|----------|-------|---------------|-----------|--|
| 項 | 推定 | 標準誤 | t 値 | p 値(Prob> t) | VIF | |
| 切片 | 6.5467368 | 0.26802 | 24.43 | 0.0017 * | | |
| X1 休日数(6,12) | 3.4905747 | 0.112649 | 30.99 | 0.0010 * | 1.251997 | |
| X2 二連休日数(0,4) | 1.4026048 | 0.120036 | 11.68 | 0.0072 * | 1.2222866 | |
| X3 残業(0,60) | 0.0352392 | 0.107124 | 0.33 | 0.7734 | 1.1321916 | |
| X4 給与増与(24,30) | 0.3606809 | 0.090593 | 3.98 | 0.0577 | 1.0594599 | |
| X5 長期連休(5,10) | -0.221039 | 0.092458 | -2.39 | 0.1393 | 1.1035228 | |
| X1 休日数*X1 休日数 | 0.5024288 | 0.206803 | 2.43 | 0.1358 | 1.064738 | |
| X2 二連休日数*X2 二連休日数 | -0.031674 | 0.223228 | -0.14 | 0.9002 | 1.4703239 | |
| X3 残業*X3 残業 | -0.497571 | 0.206803 | -2.41 | 0.1379 | 1.064738 | |
| X1 休日数*X3 残業 | 0.1621471 | 0.132636 | 1.22 | 0.3460 | 1.3463758 | |

図 2 全数選択の重回帰分析の結果の VIF 確認画面

3.5 プロファイルカード

図 3 は、この最適計画をもとに作成した全 12 枚のプロファイルカードである。カードには文字情報として条件を明記するだけでなく、その内容がイメージできるようなイラスト

を入れて作成している。月の残業時間が増えるとその分の残業代が支給されるため、その時の年収はどの程度になるかも各カードに示す工夫がなされている。

これらのカードをトランプのよう1枚1枚切り取り、実験時は12枚1セットとして回答用紙と共に実験対象者に配布した上で、実験のファシリテーションを開始する。

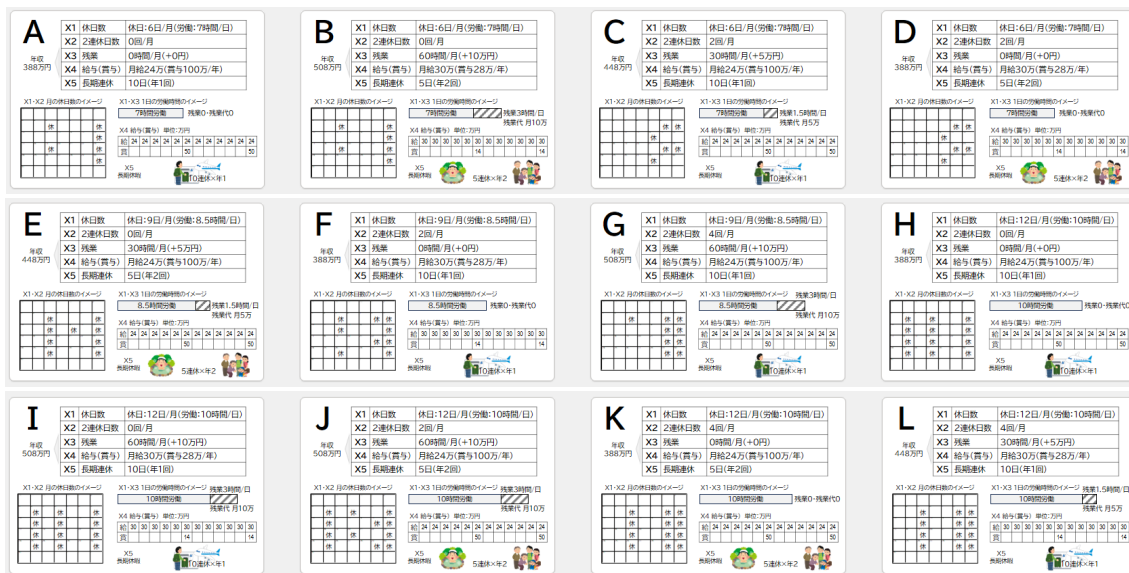


図 3 プロファイルカード (全 12 枚)

4. 階差按分評価法によるデータ収集

本研究では仮想実験の手順を10分程度の動画に録画し、回答者に動画を視聴してもらった後、階差按分評価法により実験データを収集した。動画の活用により、ファシリテータによる仮想実験の説明を標準化し、前提条件やプロフィールカード、回答者の評価法理解に大きなずれが生じないように工夫を行った^[10]。さらにファシリテータは対面で補足説明を行い、必要に応じて回答者からの質問に答えながら実験を進行した。仮想実験の回答時間は平均15分程度であり、動画の視聴からすべて終了するまでに約30分の時間を要した。

階差按分評価法の手順は以下に示す。図4は、仮想実験の説明時に用いた回答例である。

- ア. 回答者が働きたいと考える労働環境の順にプロフィールカードの順位付けを行う。
- イ. 隣り合った2つの差(階差)を評価〔6段階の選択肢: 0.差はない(順位は付けたが最後によく見ると差はないと言える), 1.差はかなり小さい, 2.差は小さい, 3.差がある, 4.差は大きい, 5.差はかなり大きいから1つ選択〕する。
- ウ. 最上位(第1位)のカードは100点満点で何点であるかを記入する。
- エ. 最下位(第12位)のカードは100点満点で何点であるかを記入する。
- オ. 以上を実験時に回答してもらう。その情報で[a]階差の6段階評価を数値と見なし、最初に[b]全体範囲を求め、次に階差の合計でこれを除して[y]按分階差単位を求め、最後に[d]計算評価点を計算する。この評価点を以降の分析に用いる。

労働環境に関する仮想実験(回答例)

1.はじめに、あなたが働きたいと思う条件の順に、カードを1位～12位まで並び替え、カードの文字を記入してください。

| | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 1位 | 2位 | 3位 | 4位 | 5位 | 6位 | 7位 | 8位 | 9位 | 10位 | 11位 | 12位 |
| D | I | E | F | L | G | B | H | J | C | A | K |
| 1 | 0 | 1 | 3 | 2 | 0 | 0 | 4 | 5 | 1 | 1 | |

2.次に、隣り合ったカードの差(階差)を評価して、以下の選択肢から最も評価に近い番号を選び記入してください。

0:差はない(順位は付けたがよく見ると差はないと言える),

1:差はかなり小さい, 2:差は小さい, 3:差がある, 4:差は大きい, 5:差はかなり大きい

3.第1位(最上位)のカードは、100点満点で評価すると【 90 】点である。

4.第12位(最下位)のカードは100点満点で評価すると【 20 】点である。

5.最後に、あなた自身に当てはまる選択肢(ア, イ, ウ…)に1つずつ○を付けてください。

| | | | | | |
|-------------|-----------|---------------|---------|-----------------|---------|
| 区分:ア.大学[]年 | イ.大学院[M1] | 年代:ア.20代以下 | イ.30代以上 | 性別:ア.男性 | イ.女性 |
| 同居人:ア.有 | イ.無 | 婚姻:ア.未婚 | イ.既婚 | アルバイト経験:ア.有 | イ.無 |
| 正社員経験:ア.有 | イ.無 | 将来やりたい仕事:ア.明確 | イ.不明確 | 終業後の教育機会:ア.希望する | イ.希望しない |

図 4 階差按分評価法を用いた仮想実験の回答例

ア. のプロフィールカードの順位付けには、3段階の順位付け方法(図5)を案内した。12枚の条件のカードを1枚1枚見比べていると時間がかかってしまい、並べ替えるのは困難である。よって、①まず大きく分けてカードを3分類してみる、②その分けたグループの中で順位付けを行い、③違うグループとの順位入れ替えを検討し、④最後に全体の順位をもう一度見直す方法を伝え、回答者に実践を促した。また、カードを大まかに分ける際は、自分が重視している労働条件の軸を基準に検討することで優先順位をつけやすくなることも補足した。

イ. の階差評価は、用意された選択肢から番号を選ぶ方式とした。選択肢は0から5までの6段階を用意した。階差評価の説明に十分時間をかけられない場合は、直接カードの得点を評価させる方法もある。

ウ. は1位のカードの得点(すなわち最高得点)、エ. は12位のカードの得点(すなわち最低得点)を100点満点中の何点かで回答してもらった。階差按分評価法の開発途中において、最高得点のみを回答してもらい、階差評価の選択肢番号を数値とみなして最高得点からの差分を各カードの評価得点とする方法も試行したが、その場合、12位の最低得点のカードの点数が感覚値より上振れする傾向にあったため、最高と最低得点から按分する方法を採用することにした。

オ. の按分計算は、表計算ソフト等を用いることで簡単に行うことができる。今回は、回答用紙にペンで回答を記入してもらう方法を用いたが、もし回答者1人1人がPCに回答を入力できる環境であれば、階差按分の計算式が入ったシートに回答を入力してもらい、その場で階差按分得点を確認してもらうこと、また、その得点に違和感があれば修正してもらうことも可能になる。

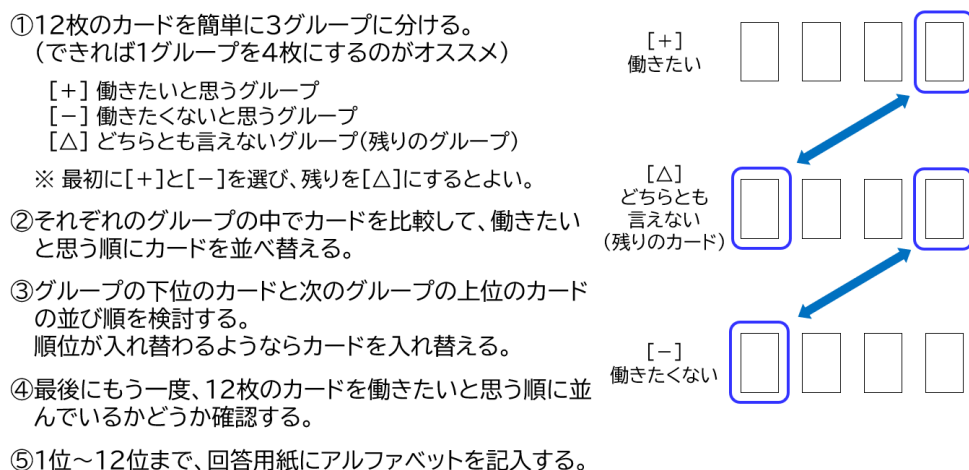


図 5 三段階の順位付け方法

5. 層別の検討

本研究では、層別を2つのステージに分け、以下の手順で検討を進める。それらの情報に基づき、層別に関する総合的な判断を行う。

ステージ 1

- 似ているかどうかの検討は、12枚のカードに対する回答者全員の評価データ(12変数)による主成分分析を用いて行う。
- 上位の主成分(第1主成分, 第2主成分)を用いて、以下の様に層別の候補を探す。
 - [A] 主成分得点散布図上ではっきり塊が現れた場合
→塊を構成している属性を候補とする。
 - [B] 主成分得点散布図上ではっきり塊が現れない場合 ※本研究は[B]に該当する。
→主成分に対して属性を説明変数とした変数選択の回帰分析で候補を見つける。

ステージ 2: 決定木分析^{[11], [12]}・判別分析を用いた層別の検討

- 属性を用いて決定木(質的な場合は分類木)を行い、有用な情報を手に入れる。
- 候補の属性に対して、主成分を用いて判別分析でどの程度判別するのかを吟味する。
...主成分は上位の主成分から順次増やし、誤判別率の様子をみて以下を判断する。
 - 誤判別率が33%前後以下ならば候補の属性で層別する。 ※本研究は①に該当する。
 - 誤判別率が33%を越えても40%前後以下なら層別をした分析結果を見て判断する。

5.1 主成分分析・重回帰分析を用いた層別の検討

ステージ1では、まずステップ1として、A~Lまでの12枚のカードに対する回答者全員の評価データによる主成分分析を行う。本事例の主成分分析結果を図6に示す。中央の主成分得点散布図上で回答者のはっきりとした塊が確認できれば、その塊の属性を確認すればよいが、本事例では塊が確認できなかった。よって、この主成分分析結果の上位の主成分(第一主成分と第二主成分)を保存し、ステップ2に進む。

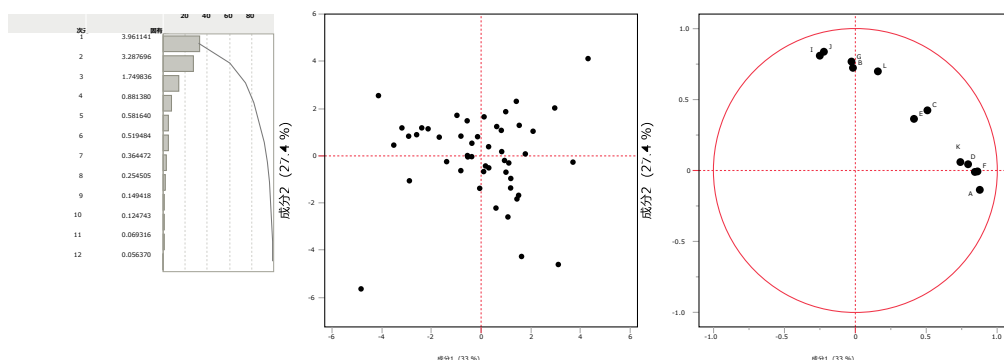


図 6 事例の層別確認のための主成分分析結果

ステップ 2 では、ステップ 1 で保存した第一主成分を目的変数、説明変数に各属性を設定し、ステップワイズ法の重回帰分析を行う。その分析途中の現在の推定値を図 7 に示す。図 7 の F 値や P 値の値から、最も影響しているのは学部生か院生かの区分であることが確認できた。

| 現在の推定値 | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------|------------|-----|----------|-------|--------------|
| ロック | 追加 | パラメータ | 推定値 | 自由度 | 平方和 | "F値" | "p値(Prob>F)" |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 切片 | 5.5511e-17 | 1 | 0 | 0.000 | 1 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 学/院{2-1} | 0 | 1 | 14.82798 | 3.981 | 0.05197 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 性別{2-1} | 0 | 1 | 0.332889 | 0.082 | 0.77536 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 同居人{1-2} | 0 | 1 | 2.030712 | 0.507 | 0.47991 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 将来{1-2} | 0 | 1 | 0.266556 | 0.066 | 0.79846 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 教育機会{2-1} | 0 | 1 | 0.03693 | 0.009 | 0.92431 |

図 7 事例の層別確認のための重回帰分析（現在の推定値）

5.2 決定木分析（分類木）・判別分析を用いた層別の検討

ステージ 2 では、さらに詳細に層別の検討を進める。ステップ 3 として、目的変数にステップ 1 で保存した主成分 1、説明変数に大学生か院生かの区分、性別、同居人の有無、将来が明確か不明確か、卒業後の教育を希望するか否かの属性を設定し、決定木分析（分類木）で分岐を確認した（図 8）。その結果、最初に大学の学部生と院生が分岐し、学部生は次に将来が明確か不明確かで分岐することが確認できた。

ステップ 4 では、これらの候補の属性に対して、上位の主成分を用いて判別分析でどの程度判別するかを確認する。判別分析を行う際は上位の主成分は順次増やしていき、誤判別率をみて、33%（3分の1）以下であれば、その属性で層別する。

図 9 は、学部生と院生の判別分析結果である。誤判別の割合は 27%であり、この区分で層別を行った方がよいと判断できた。次に、学部生 36 名のデータのみで主成分分析を行い、上位の主成分を保存して同様の手順で判別分析を行った（図 10）。その結果の誤判別の割合も 28%であり、こちらも層別を行った方がよいと判断することができた。

検討の結果、本事例では、学部生で将来やりたい仕事が明確な①学部生【将来明確】、学

部生で将来やりたい仕事不明確な②学部生【将来不明確】、社会人大学院生を含む③院生の3つの層に分けて分析することにした。

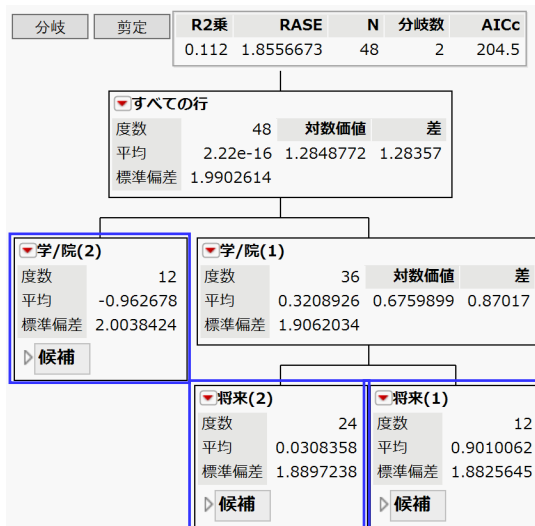


図 8 事例の層別確認のための決定木分析（分類木）結果

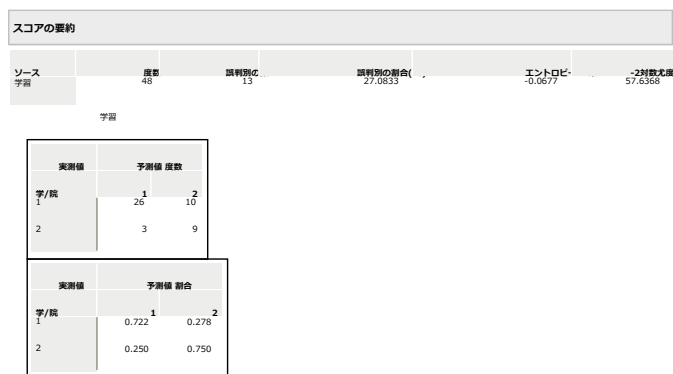


図 9 事例の層別確認のための判別分析結果（全データ）

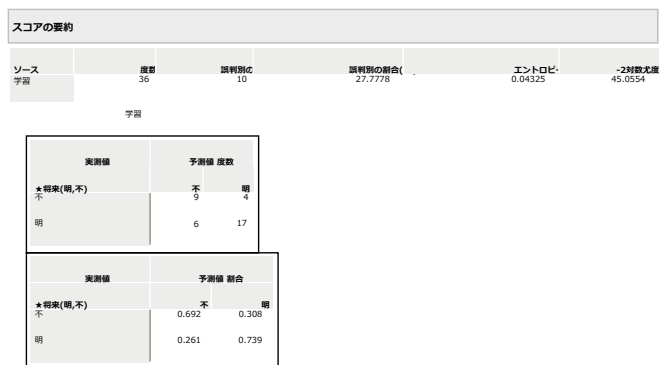


図 10 事例の層別確認のための判別分析結果（学部生データ）

6. 各層の分析結果

①学部生【将来明確】12名、②学部生【将来不明確】24名、③院生12名の3層に分け、階差按分得点から各カード（A～L）の評価点の平均値を算出し、それをY（目的変数）に設定してステップワイズ（変数選択）法による重回帰分析を行った。

6.1 学部生【将来明確】の分析結果

①学部生【将来明確】の重回帰分析のステップワイズ履歴を表6、重回帰分析結果を表7に示す。表6を確認すると休日数と残業の交互作用や残業の2次項はあまり効いていないことがわかる。

①の層は、3層の中で最も二連休や長期連休、休日数などを総合した休日総数を重視していた。2連休は毎週（すなわち月4回の2連休）、年1回の10連休も望んでいた。残業は2次項が効いているが、満足度を最大にする条件は月10時間程度であり、それ以上の残業になると満足度が低下する傾向にあった。

これらのことから、学部生が将来を明確にイメージにしている仕事は、経営が安定しており、労働条件や福利厚生も充実している企業に勤務することを前提として考えているのではないかと推測される。大企業では、新卒採用時に提示する労働条件として週休2日制かつ年間休日数が125日以上を謳っており、その労働条件を希望している可能性がある。

表6 ①学部生【将来明確】の重回帰分析ステップワイズ履歴

| ステップ | パラメータ | アクション | "p値" | 逐次平方和 | R2乗 | 増分% |
|------|-------------|-------|--------|----------|--------|--------|
| 1 | X2二連休日数 | 追加 | 0.0423 | 238.5636 | 0.3513 | 35.1 ◎ |
| 2 | X5長期連休 | 追加 | 0.0763 | 135.7656 | 0.5512 | 20.0 ○ |
| 3 | X1休日数 | 追加 | 0.1132 | 86.38108 | 0.6784 | 12.7 △ |
| 4 | X1休日数*X1休日数 | 追加 | 0.0935 | 76.37333 | 0.7908 | 11.2 △ |
| 5 | X3残業 | 追加 | 0.0297 | 81.38181 | 0.9107 | 12.0 △ |
| 6 | X1休日数*X3残業 | 追加 | 0.1102 | 26.04374 | 0.9490 | 3.8 |
| 7 | X3残業*X3残業 | 追加 | 0.1574 | 14.88906 | 0.9709 | 2.1 |

[凡例] 寄与率（R2乗）の増分% ◎:大, ○:中, △:小

表7 ①学部生【将来明確】の重回帰分析結果

| 項 | 推定値 | 標準誤差 | t値 | p値 | 標準β | VIF |
|--------------|-------|------|-------|--------|-------|------|
| R2乗 | 0.97 | | | | | |
| 自由度調整済R2乗 | 0.92 | | | | | |
| 切片 | 67.14 | 1.66 | 40.33 | <.0001 | 0.00 | . |
| X1休日数(6,12) | 3.88 | 0.80 | 4.85 | 0.008 | 0.44 | 1.16 |
| X2二連休日数(0,4) | 3.53 | 0.85 | 4.16 | 0.014 | 0.38 | 1.12 |
| X3残業(0,60) | -2.89 | 0.77 | -3.74 | 0.020 | -0.33 | 1.07 |
| X5長期連休(5,10) | 2.75 | 0.67 | 4.11 | 0.015 | 0.36 | 1.06 |
| X1休日数*X1休日数 | -5.94 | 1.52 | -3.91 | 0.017 | -0.34 | 1.05 |
| X3残業*X3残業 | -2.64 | 1.52 | -1.74 | 0.157 | -0.15 | 1.05 |
| X1休日数*X3残業 | -1.89 | 0.88 | -2.15 | 0.098 | -0.19 | 1.08 |

6.2 学部生【将来不明確】の分析結果

②学部生【将来不明確】の重回帰分析のステップワイズ履歴を表8、重回帰分析結果を表9に示す。表8のステップワイズ履歴から休日数の2次項が最もよく効いていることが確認できる。

②の層では、休日数が月9日程度の休暇が満足度を最大にする条件であった。2連休も毎週（月4回の2連休）であることを重視していた。また、残業は2次項が効いており、少ないよりは多い方がよいが、月34時間程度がベストであり、それ以上多すぎることは望まれていなかった。

これらの休日数、残業の傾向は、どちらも水準として用意した範囲のほぼ中央に当たり、目標が不明確な学生の層では、労働条件も中庸なものを選びがちになってしまったのではないかと考えられる。アンケート調査を行った場合、学生の回答から残業をまったく希望しないという傾向がみられることがあるが、実験の条件に設定し、他の条件との組み合わせや比較による検討を行うと、必ずしもまったく残業なしがベストではないことが確認できる。

長期連休や給与賞与の受け取り方は、寄与率の増分はわずかであった。月額給与は少なめであっても賞与（ボーナス）として多くもらいたいという傾向であり、賞与に対する憧れを持つ学生ならでの傾向がみられた。

表8 ②学部生【将来不明確】の重回帰分析ステップワイズ履歴

| ステップ | パラメータ | アクション | "p値" | 逐次平方和 | R2乗 | 増分% |
|------|-------------|-------|--------|----------|--------|--------|
| 1 | X1休日数*X1休日数 | 追加 | 0.0155 | 156.7945 | 0.6039 | 60.4 ◎ |
| 2 | X2二連休日数 | 追加 | 0.0235 | 50.76036 | 0.7995 | 19.6 ○ |
| 3 | X3残業*X3残業 | 追加 | 0.1575 | 23.94644 | 0.8917 | 9.2 △ |
| 4 | X5長期連休 | 追加 | 0.1283 | 11.20646 | 0.9349 | 4.3 |
| 5 | X4給与賞与 | 追加 | 0.1452 | 7.594017 | 0.9641 | 2.9 |

[凡例] 寄与率 (R2乗) の増分% ◎:大, ○:中, △:小

表9 ②学部生【将来不明確】の重回帰分析結果

| 項 | 推定値 | 標準誤差 | t値 | p値 | 標準β | VIF |
|---------------|-------|------|-------|--------|-------|------|
| R2乗 | 0.96 | | | | | |
| 自由度調整済R2乗 | 0.90 | | | | | |
| 切片 | 63.04 | 1.17 | 54.09 | <.0001 | 0.00 | . |
| X1休日数(6,12) | -0.41 | 0.55 | -0.75 | 0.495 | -0.08 | 1.14 |
| X2二連休日数(0,4) | 2.55 | 0.58 | 4.37 | 0.012 | 0.44 | 1.12 |
| X3残業(0,60) | 0.81 | 0.52 | 1.54 | 0.198 | 0.15 | 1.05 |
| X4給与賞与(24,30) | -0.82 | 0.46 | -1.81 | 0.145 | -0.17 | 1.04 |
| X5長期連休(5,10) | -0.94 | 0.46 | -2.07 | 0.108 | -0.20 | 1.04 |
| X1休日数*X1休日数 | -7.35 | 1.05 | -7.02 | 0.002 | -0.68 | 1.06 |
| X3残業*X3残業 | -2.80 | 1.05 | -2.67 | 0.056 | -0.26 | 1.06 |

6.3 院生の分析結果

③院生の重回帰分析のステップワイズ履歴を表 10、重回帰分析結果を表 11 に示す。③の層は、残業が 1 次項も 2 次項もよく効いており、少ないよりは多い方がよく、月 52 時間程度が満足度を最大にする条件であった。1 日の残業時間に換算すると 2.6 時間となり、通常の勤務時間にこの時間がプラスされることになる。また、2 連休以上に月の休日数を重視していた。この層は、すでに正社員で働いている人が多く含まれているためか、残業や休日数については、現在の働き方が回答に影響を与えている可能性が高い。

給与賞与の受け取り方は、学部生の②の層とは逆で、賞与より毎月の給与支給を重視し、賞与は少なめでも月給を多くもらいたいという傾向であった。社会人経験があることで、賞与（ボーナス）は業績と連動しており満額支給されないという実態を知っていること、さらに離職・転職を考えたことがある場合、賞与支給のタイミングまで待たずにいつでも動ける状態であることがよいとすれば、月給を重視する判断になると推測される。

表 10 ③院生の重回帰分析ステップワイズ履歴

| ステップ | パラメータ | アクション | "p値" | 逐次平方和 | R2乗 | 増分% |
|------|-----------------|-------|--------|----------|--------|--------|
| 1 | X3残業 | 追加 | 0.0031 | 1127.297 | 0.6009 | 60.1 ◎ |
| 2 | X1休日数 | 追加 | 0.0073 | 425.7959 | 0.8279 | 22.7 ○ |
| 3 | X2二連休日数 | 追加 | 0.0393 | 139.0728 | 0.9020 | 7.4 △ |
| 4 | X3残業*X3残業 | 追加 | 0.0273 | 96.46297 | 0.9534 | 5.1 △ |
| 5 | X1休日数*X1休日数 | 追加 | 0.0334 | 48.66988 | 0.9794 | 2.6 △ |
| 6 | X2二連休日数*X2二連休日数 | 追加 | 0.1246 | 15.66042 | 0.9877 | 0.8 |
| 7 | X5長期連休 | 追加 | 0.1283 | 11.01173 | 0.9936 | 0.6 |
| 8 | X4給与賞与 | 追加 | 0.0205 | 10.48459 | 0.9992 | 0.6 |

[凡例] 寄与率（R2乗）の増分% ◎:大, ○:中, △:小

表 11 ③院生の重回帰分析結果

| 項 | 推定値 | 標準誤差 | t値 | p値 | 標準β | VIF |
|-----------------|-------|------|--------|--------|-------|------|
| R2乗 | 0.99 | | | | | |
| 自由度調整済R2乗 | 0.99 | | | | | |
| 切片 | 66.95 | 0.63 | 106.19 | <.0001 | 0.00 | . |
| X1休日数(6,12) | 7.07 | 0.27 | 26.24 | 0.000 | 0.49 | 1.25 |
| X2二連休日数(0,4) | 3.18 | 0.28 | 11.24 | 0.002 | 0.20 | 1.19 |
| X3残業(0,60) | 10.07 | 0.25 | 40.44 | <.0001 | 0.69 | 1.07 |
| X4給与賞与(24,30) | 0.98 | 0.22 | 4.50 | 0.021 | 0.08 | 1.06 |
| X5長期連休(5,10) | -1.08 | 0.22 | -4.96 | 0.016 | -0.08 | 1.06 |
| X1休日数*X1休日数 | -5.29 | 0.49 | -10.72 | 0.002 | -0.18 | 1.06 |
| X2二連休日数*X2二連休日数 | -2.11 | 0.48 | -4.39 | 0.022 | -0.08 | 1.19 |
| X3残業*X3残業 | -6.79 | 0.49 | -13.76 | 0.001 | -0.24 | 1.06 |

7. 3つの層の比較考察と提案

7.1 構造模型表を用いた3層の比較考察

3層の比較考察を行うため、分析結果に基づき仮想実験事例の構造模型表（結果）を作成した（表12）。斜線部分は、今回の事例では対象外と考え、分析を行わなかった積項と2次項である。表12の分類はp値に基づき、0.01未満には強◎（強い影響あり）、0.01～0.05未満には中○（しっかりと影響あり）、0.05を越えた場合は弱△（弱い影響あり）とし、標準偏回帰係数の符号が正であれば（+）、負であれば（-）を付けた。変数選択されなかった積項や2次項は×（影響なし）とした。

表12から、特に残業や2連休の考え方において、①と②の学部生の層と③の社会人院生の層では明らかに違いがあることが確認された。社会人経験者には、新卒で働く場合の労働条件であることを前提に回答してもらったが、実際の就労経験を踏まえると希望する労働条件に変化がある考えられる。①②の学部生にとっての労働条件は示された情報と想像の範囲においての回答であるが、③の院生はこれまでの就労経験と労働に対する知識の蓄積がある。このことが本事例の結果にも影響し、明確な違いとして現れたと考えられる。

学部生においては、将来が明確か不明確かによって回答傾向の違いが確認された。将来の目標が明確ではない学生の回答には、各因子に設定した水準の真ん中を選びがちな傾向が

表12 事例の構造模型表

①学部生【将来明確】

| 因子 | 1次効果 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 |
|--------|------|------|----|------|----|----|
| X1休日数 | ◎(+) | ○(-) | / | △(-) | / | / |
| X2二連休 | ○(+) | | × | / | / | / |
| X3残業 | ○(-) | | | △(-) | / | / |
| X4給与賞与 | × | | | | / | / |
| X5長期連休 | ○(+) | | | | | / |

②学部生【将来不明確】

| 因子 | 1次効果 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 |
|--------|------|------|----|------|----|----|
| X1休日数 | △(-) | ◎(-) | / | × | / | / |
| X2二連休 | ○(+) | | × | / | / | / |
| X3残業 | △(+) | | | △(-) | / | / |
| X4給与賞与 | △(-) | | | | / | / |
| X5長期連休 | △(-) | | | | | / |

③院生

| 因子 | 1次効果 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 |
|--------|------|------|------|------|----|----|
| X1休日数 | ◎(+) | ◎(-) | / | × | / | / |
| X2二連休 | ◎(+) | | ○(-) | / | / | / |
| X3残業 | ◎(+) | | | ◎(-) | / | / |
| X4給与賞与 | ○(+) | | | | / | / |
| X5長期連休 | ○(-) | | | | | / |

【凡例】◎：強(<0.01), ○：中(0.01~0.05), △：弱(0.05>), ×：なし(非選択)

みられた。希望もはっきりしないため中庸の労働条件を選んでいる可能性が示唆された。しかし、本実験ではまだ多くの実験データを集められていないため、今後追加データを収集し、本実験で得られた特徴を再確認する必要がある。

7.2 予測式の可視化に基づく考察

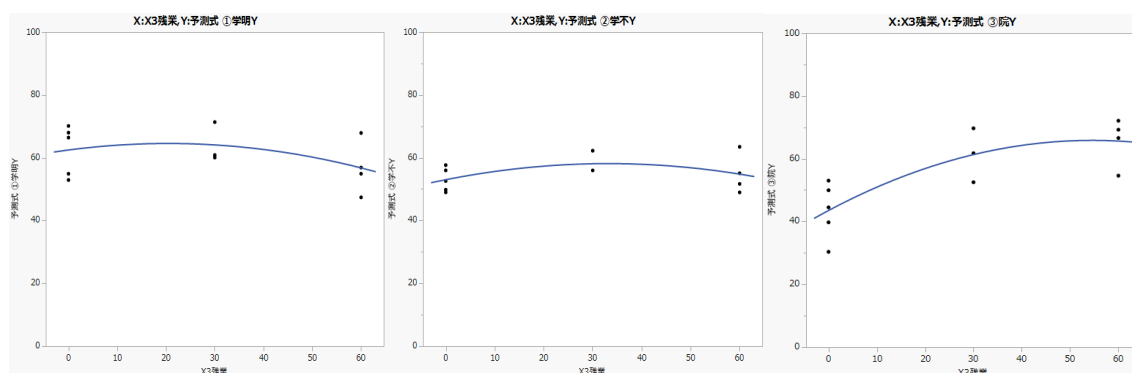
前節で行った重回帰分析の結果の予測式を縦軸、横軸に残業（図 11）、二連休（図 12）、休日数（図 13）、長期連休（図 14）を取り、可視化したグラフを層で比較できるように作成した。これらは、重回帰分析のステップワイズ履歴で確認した寄与率の増分%がある程度大きく、各層での違いが見られた因子である。

いずれの図においても、中央にある (2) 学部生【目標不明確】は中庸の傾向がみられる。これは、将来の目標が明確でないことにより、提示された条件の中央のカードを選ぶ学生が多かったことの影響ではないかと考えられる。

図 11 の残業においては、(1) (2) の学部生と (3) の院生の傾向の違いが明らかである。(3) 院生はむしろ多くの残業を望む傾向にあり、出勤した日に多く働いて稼ぎ、図 13 から休日もしっかり確保したいという働き方を希望している。二連休については、必要ないという人と毎週必要という人に回答が分かれており、現在の働き方や現在までの経験によって自分の勤務スタイルがある程度確立されているのではないかと推測される。

また、長期連休は 10 日間連続で取りたいという傾向が強かったのは、(1) 学部生【目標明確】であった（図 14）。この層は、働き方、労働条件に対する理想が高いことが窺われる。

このように可視化したグラフを作成することで、3 層の比較ポイントが明らかになり、さらに満足度を最大化する条件も確認することができる。アンケート調査では、手を打つべき重要な項目が明確になっても、それはあくまでも結果に対して強く影響を与える項目であるという新たな仮説が得られた状態である。新たな仮説に対し、因子と水準を用意して仮想実験を行えば、具体的な施策の設計が可能になる。

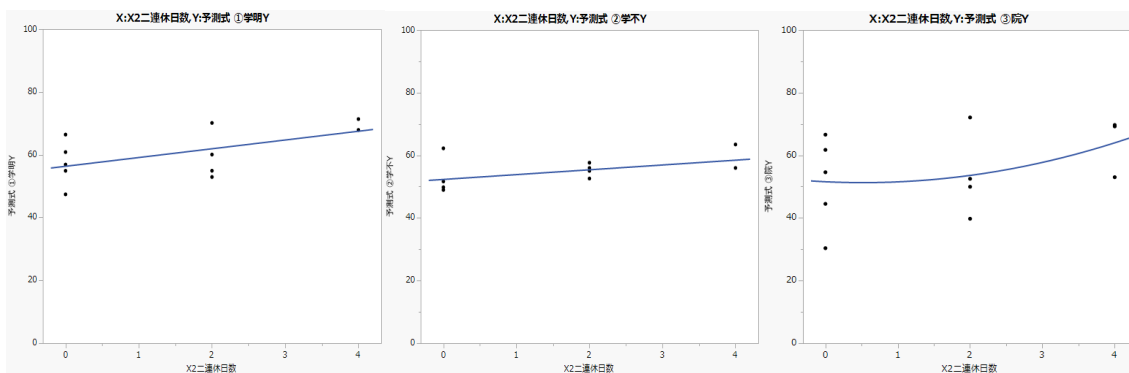


(1) 学部生【目標明確】

(2) 学部生【目標不明確】

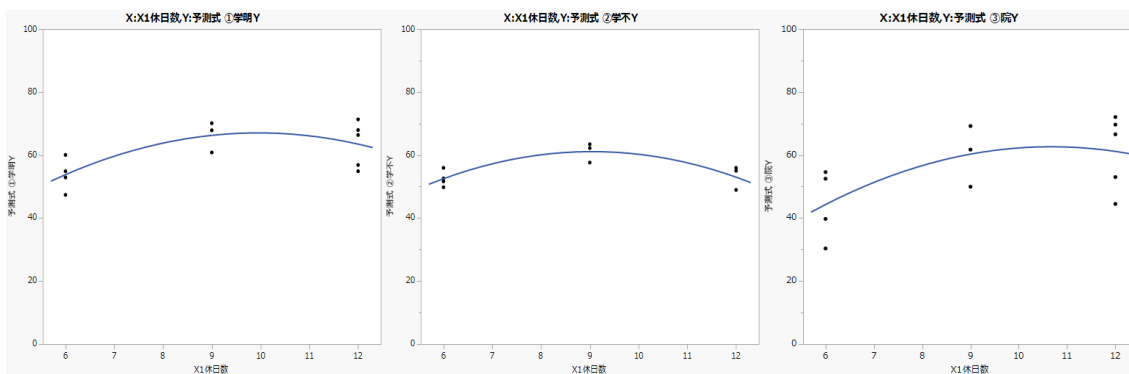
(3) 院生

図 11 残業に関する予測式グラフの比較



(1) 学部生【目標明確】 (2) 学部生【目標不明確】 (3) 院生

図 12 二連休に関する予測式グラフの比較



(1) 学部生【目標明確】 (2) 学部生【目標不明確】 (3) 院生

図 13 休日数に関する予測式グラフの比較

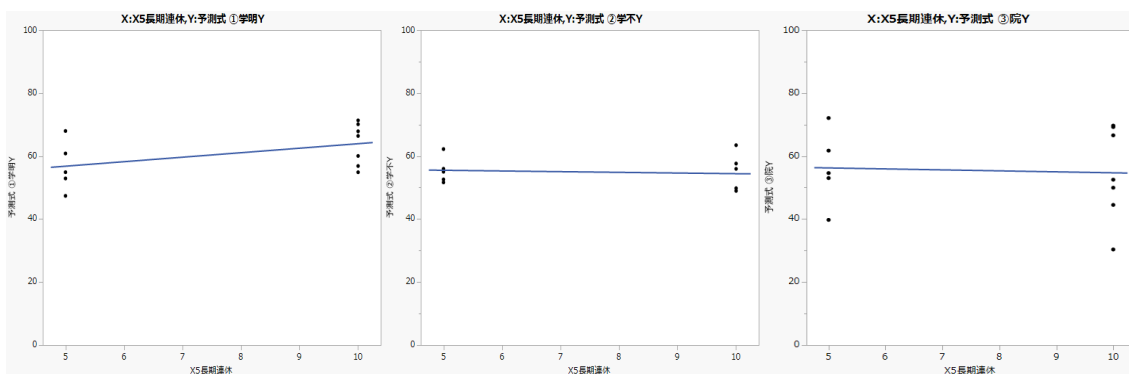


図 14 長期連休に関する予測式グラフの比較

7.3 S社への提案

S社の採用の中心は学部生①②の層であることから、休日数に重点をおき、週休3日制を導入したことは、世間一般の標準的な施策に埋もれず、大学生の注目を集めるインパクトがあったと言える。しかし、注意しなければならないのは1日の労働時間が長くなり過ぎる

ことである。週休3日制の場合、1日の労働時間が10時間想定となる。

①②の学部生は、少しの残業であればよいが多すぎることは望んでおらず、月の労働時間に換算すると10時間から多くても30時間を超えないことが望ましい。採用だけでなく、定着率を高めるために、1日の拘束時間は10時間を目安としておくことを提案したい。

8. おわりに

本研究では、企業からの依頼に基づき計画した大学生および大学院生を対象とする労働環境に関する仮想実験の事例を用い、最適計画を立て、階差按分評価法により取得した仮想実験データの層別の検討に統計的な手法を活用した。その後、①将来目標が明確な学部生、②将来目標が不明確な学部生、③院生の3層に分けて分析・考察を行い、各層の特徴を明らかにした。

層別の検討には、主成分分析、重回帰分析、決定木分析、判別分析の分析手法を用いた。いずれも分析結果の統計的な数値や可視化された図を確認し、そこに専門的な知見を加味して分類する3層を決定した。その後の分析において、①と②の大学の学部生と③院生の層には、特に残業や休日に関して、その特徴に明確な違いが確認された。本実験の③院生の層には、社会人経験者が多く含まれていることから、実務経験により労働環境の希望に変化があることが示唆された。

本事例では、階差按分評価法でのデータ収集を継続し、大学生および飲食系の専門学校生の仮想実験の回答者数を増やす予定である。本研究で得られた大学の学部生の特徴を再確認し、専門学校生との比較を行うことが今後の課題である。

参考文献

- [1] 高橋武則 (2022):“仮想実験としての質問紙実験”, JSQC 第 52 回年次大会発表要旨集, 133-136.
- [1] 川崎昌,高橋武則,小川昭 (2022):“データサイエンスに基づく積項と2次項を対象とした質問紙実験”,JSQC 第 52 回年次大会発表要旨集, 55-158.
- [3] 川崎昌,高橋武則,小川昭 (2023):“仮想実験における回答者の層別に基づく分析”,JSQC 第 53 回年次大会発表要旨集,29-32.
- [4] Kawasaki, S., Takahashi, T., Suzuki, K., 2015, Study of classification in questionnaire surveys and questionnaire experiments in human resource management, Proc. of the Asian Network for Quality Congress 2015 in Taipei, 1-13.
- [5] 川崎昌,高橋武則,小川昭 (2023):“階差按分評価法を用いた仮想実験の試行”,JSQC 第 131 回研究発表会発表要旨集, 121-124
- [6] 川崎昌,高橋武則,小川昭 (2023):“仮想実験のデータ収集方法に関する検討”,JSQC 第 132 回研究発表会発表要旨集,49-52.
- [7] 岡本眞一 (1999):「コンジョイント分析 SPSS によるマーケティングリサーチ」, ナカ

ニシヤ出版

- [8] 池本浩幸, 山岡俊樹 (2010): “完全プロファイル型コンジョイント分析の効果的活用”. 日本感性工学会論文誌, 9(2), 215-225.
- [9] 川崎昌, 高橋武則 (2022): “実践的な質問紙実験”, Discovery Summit Japan 2022 論文集. SAS Institute Japan 株式会社 JMP ジャパン事業部, 15-28.
- [10] 川崎昌, 高橋武則, 小川昭 (2023): “仮想実験による大学生の就業環境意識分析”, JSQC 第133回研究発表会発表要旨集, 14-17.
- [11] 糸谷圭介, 糸谷素子, 原良昭, & 加藤順一. (2015). リハビリテーション病院入院患者における在宅復帰のための要因の検討 -決定木分析を用いて-. ヘルスプロモーション理学療法研究, 4(4), 171-175.
- [12] 澤島秀成, 杉山陽二, & 山岡俊樹. (2005). ユーザ属性と製品評価の関係分析における決定木の有用性. デザイン学研究, 52(4), 15-24.

済生会病院における医師の働き方に関する実態調査データの分析
Analysis of Data from a Survey of Physicians' Work Styles
at Saiseikai Hospital

佐村 紫帆^{1,2}
Shiho SAMURA
A

【要旨】

本研究は、医師の働き方を適正化するための2024年4月に施行される医師の働き方改革に向けて実施された調査データを分析したものである。本研究の調査対象病院は、日本の公的医療機関としては日本最大の社会福祉法人である恩師財団済生会（許可病床数22,191床）の81病院とした。そのうち76病院・1468名の常勤医師から無記名自己記入式質問紙調査で回答を収集した（回答率35%）。公開されている病床機能報告等のデータを活用し、病床機能区分やアンケート回答医師の分布に留意した。

本研究はJMPのパーティション分析を使用し、樹形解析モデル（CART：Classification and regression tree）による回帰木を用いているところに特徴があるのでそれに関連する部分について焦点を合わせて紹介する。なお、本研究の全体に関する論考については近い将来詳細な報告を予定している。

【キーワード】 JMP、パーティション分析、樹形解析モデル（CART：Classification and regression tree）、医師の働き方改革、長時間勤務

Abstract

This paper analyzed data from a survey conducted in preparation for the reform of the way physicians work, which will come into effect in April 2024 to optimize the way physicians work. The hospitals surveyed for this study were 81 hospitals of the Onshi Foundation Saiseikai (22,191 licensed beds), Japan's largest social welfare corporation as a public medical institution in Japan. Responses were collected from 1,468 full-time physicians at 76 of these hospitals using a self-administered, anonymous questionnaire survey (35% response rate). The distribution of bed function categories and physicians who responded to the questionnaire were noted by utilizing publicly available data such as the Functional Report of Hospital Beds.

This paper is characterized by the use of JMP partition analysis and regression trees based on the classification and regression tree model (CART). A detailed discussion of the entire study will be presented in the near future.

佐村 紫帆 (Shiho SAMURA) 慶應義塾大学院 健康マネジメント研究科

Keywords: JMP, partition analysis, tree analysis model (CART: Classification and regression tree), physician work style reform, long working hours

Keywords: JMP, partition analysis, tree analysis model (CART: Classification and regression tree), physician work style reform, long working hours

1 はじめに

JMPのパーティション分析は非常に使い安く、目的変数におく一つの項目に対してその他の変数がどのように分かれるのか可視化して見ることができることが特徴である。特に、探索的にデータ分析を行う際には、さまざまな項目を目的変数において分析をしてみることで、データの着目する項目を検討することが可能となる。今回実施するパーティション分析では、影響度の大きさに必ずしも固執することなく、目的変数に対してその他の項目がどのように枝分かれしていくのかを探索するため、項目とその分かれ方に着目することとする。

2 先行研究

今回活用する調査データを樹形解析モデルで分析した先行研究がある。職場満足度に対する疲労蓄積に着目した分析で、結果として、医師の疲労や心身への不安、眠気、医師の高ストレス状態などは満足度に大きな影響を与えることがわかった。吉村 (Yoshimura, 2022) によれば済生会医師の職場に対する総合的な満足度を上げるためには、まずは、医師の疲労の蓄積の軽減に注意を向ける必要があると結論づけている。

3 方法

統計ソフトJMPのパーティション分析を活用して、樹形解析モデル (CART: Classification and regression tree) による回帰木を作成する。

活用するデータは下記の3つであり、これらを一つのデータセットにまとめるために、①第2回医師調査を基準として、所属病院ごとに②病床機能報告と③臨床評価指標のデータを結合させた。

① 恩賜財団済生会, 「済生会病院医師の働き方の実態と今後の在り方に関する研究」第2回医師調査

日本の公的医療機関としては最大の社会福祉法人である恩賜財団済生会 (許可病床数22,191床) の81病院に所属する常勤勤務医師を対象とし、2021年年度末に実施した調査データ。76病院に所属する常勤医師1468名からオンライン無記名自己記入式質問紙調査で回答を収集した (回答率35%)。

② 厚生労働省, 令和3年度病床機能報告 施設

病床機能報告は、医療法 (昭和23年法律第205号) 第30条の13に基づいて実施する制度で、一般病床・療養病床を有する病院・有床診療所が報告対象となる。

③ 恩賜財団済生会, 平成29年度医療の質の評価・公表推進事業における臨床評価指標

済生会における医療の内容を国民の方々に開示することでさらなる医療の質向上をはかることを目的に調査され、医療の不確実性や医療者の日々の研鑽などの特徴から、医療の質は絶対的な基準で評価されるのではなく相対的な評価が基本であると説明されている（恩賜財団済生会，2020）。医療の質評価は、構造(ストラクチャー)、過程(プロセス)、結果(アウトカム)の3つの側面から評価されるという前提の上で(Donnabedian, 1966)、調査票は国立病院機構での臨床指標の取り組みを元に設計された。

2段階のパーティション分析を行う。1段階目は常勤医師個人に焦点を当てた所属病院における働き方の分析であり、2段階目は病床機能区分の高度急性期・急性期病院に焦点を当てた所属病院勤務時間と病院特徴における関連の分析である。どちらも目的変数には、常勤医師の所属病院における勤務時間とする。勤務時間は、40時間未満、40時間以上60時間未満、60時間以上80時間未満、80時間以上の4水準である。常勤医師の1週間の勤務時間の平均値は54.3時間、中央値は50時間、最頻値は40時間以上60時間未満である（図1）。

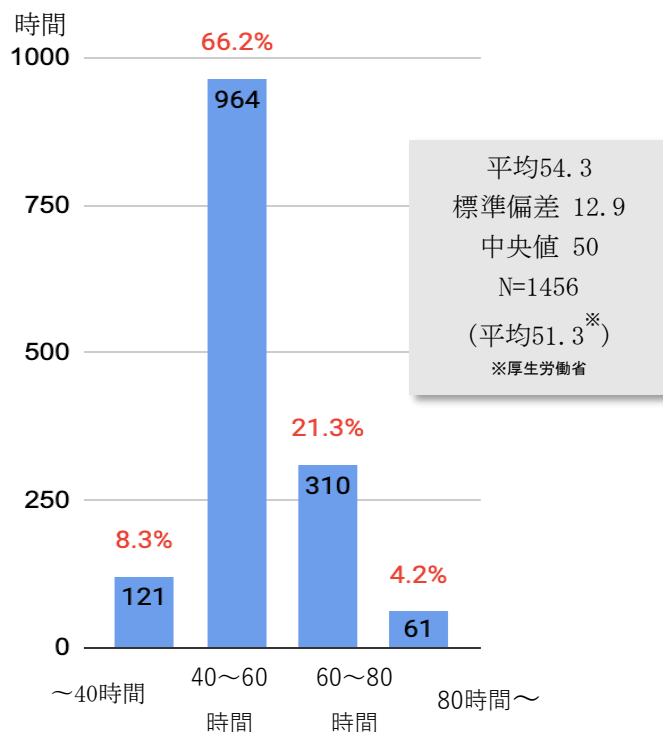


図1. 所属病院勤務時間（時間/週）

表1. 勤務状況のパーティション分析に使用する変数一覧

| |
|----------------------------|
| 目的変数 |
| CQ1_所属病院勤務時間/workhr |
| 説明変数 |
| CQ2_兼業先勤務時間(時間)/kengyohrs1 |
| CQ3_自発的研鑽(時間)/kensan1 |
| CQ4_指示された活動(時間/月)/kensan2 |
| CQ5_夜間オンコール(回/月)/nightcall |
| CQ6_休日オンコール(回/月)/wkendcall |
| CQ7_片道通勤時間(分)/commutemin |
| CQ8_休憩時間/lunchbreak |
| CQ9_最短インターバル(時間)/sinterval |

4 結果

- ④ 1段階目のパーティション分析では、「済生会病院医師の働き方の実態と今後の在り方に関する研究」第2回医師調査のデータで、常勤医師個人に焦点を当てた所属病院における働き方の分析を行う。目的変数に「所属病院勤務時間(週/時間)」、説明変数に「兼業先勤務時間」「自発的研鑽時間」「指示された活動時間」「夜間オンコール回数」「休日オンコール回数」「片道通勤時間」「休憩時間」「最短インターバル時間」を加え分析を行った(表1)。結果として、常勤医師個人の所属病院勤務時間には、最短インターバルが11.6時間未満であることが最も影響度が高く分類された。次に、長時間勤務に影響度の高い項目での分類を探索するために、勤務時間を長くする分類の方へ分岐を進めた。それにより、自発的研鑽時間が20時間以上であること、夜間オンコール回数が2回/月以上、指示された活動が20時間/月以上であることが続いた(図2)。

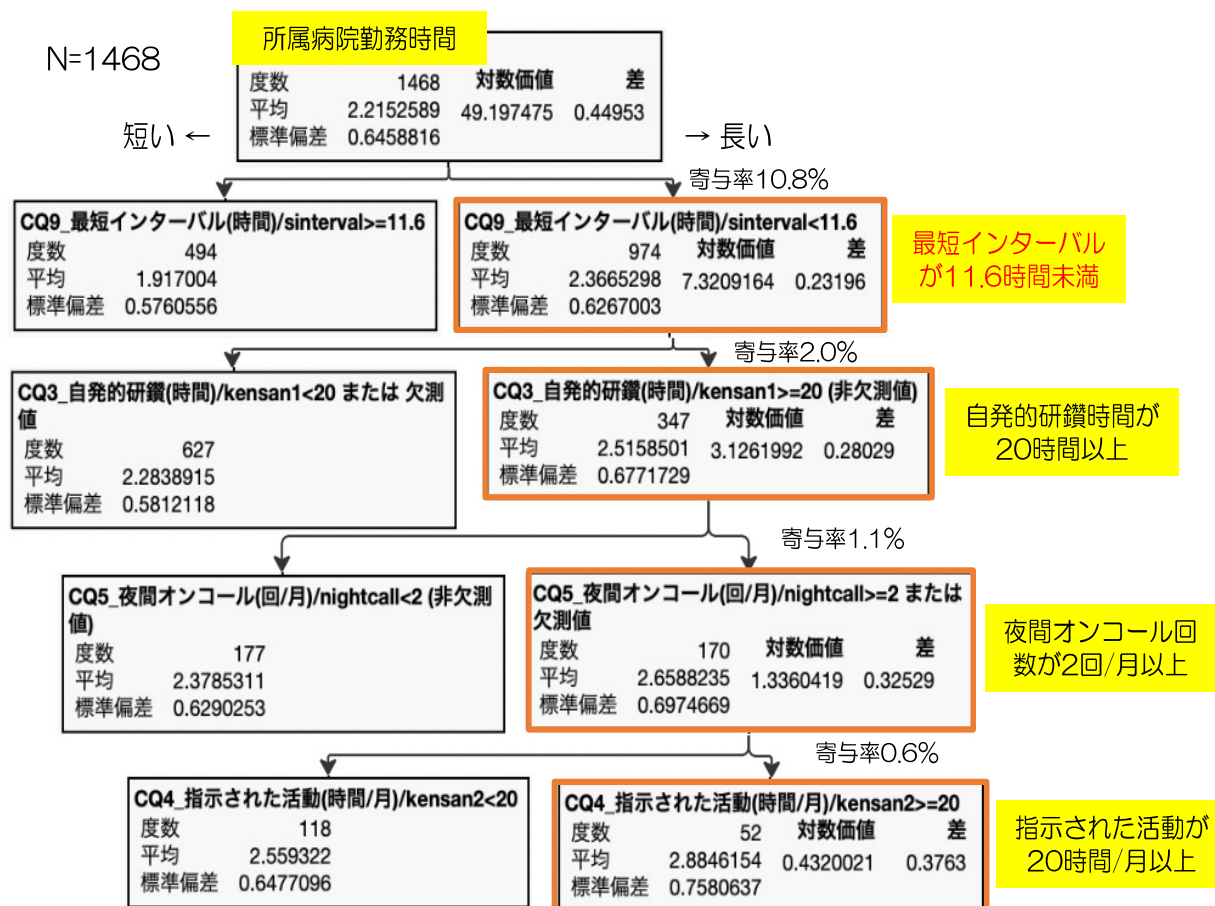


図2. 済生会常勤医師の勤務状況に関するパーティション分析

2段階目のパーティション分析では、高度急性期・急性期病院に所属する1416名の医師に絞って分析を行うこととし、②病床機能報告と③臨床評価指標のデータを結合させたデータセットを活用した。目的変数を常勤医師の所属病院勤務時間とし、説明変数を病床機能報告と臨床評価指標に含まれる項目を選択した(表2)。結果として、長時間勤務に影響する病床機能や病院の特徴として、休日受診後に即入院する患者数が多いことが最上位に選ばれた。次に、長時間勤務に影響度の高い項目での分類を探索するために、勤務時間を長くする分類の方へ分岐を進めた。それにより、手術室非常勤看護師が比較的少ないこと、院内での苦情処理数が比較的多いことが続いた(図3)。

表2. 「所属病院勤務時間」のパーティション分析に使用する変数一覧

目的変数

CQ1_所属病院勤務時間/workhr

説明変数

厚生労働省, 令和3年度病床機能報告 施設

二・三次救急医療施設の認定の有無
 救急告示病院の告示の有無
 休日に受診した患者数・即入院患者数
 夜間・時間外に受診した患者数・即入院患者数
 救急車の受入件数
 施設全体の最大・最小使用病床数
 医療機器の台数
 退院調整部門の有無
 退院調整部門に勤務する職員数(専従・専任)
 医師・看護職員・MSW・事務員・その他
 施設全体の職員数(常勤・非常勤)
 医師・看護師・准看護師・看護補助者等
 手術室の職員数(常勤・非常勤)
 看護補助者・助産師・理学療法士等
 外来部門の職員数(常勤・非常勤)
 作業療法士・言語聴覚士・薬剤師等
 その他の部門の職員数(常勤・非常勤)
 看護師・准看護師・看護補助者等
 特定機能病院の承認の有無
 地域医療支援病院の承認の有無
 総合入院体制加算の届出の有無
 在宅療養支援病院の届出の有無
 在宅療養後方支援病院の届出の有無
 医療機関以外での看取り数
 医療機関での看取り数

恩賜財団 済生会, 平成29年度臨床評価指標

無料低額診療実施割合
 患者からの苦情に対する処理割合
 インシデント・アクシデント調査
 医療ソーシャルワーカー業務担当職員数
 入院・外来患者の満足度
 公費負担医療患者の割合
 回復期リハビリテーション病棟退院患者の在宅復帰率
 手術難易度分類別の患者割合
 糖尿病合併症管理料算定者一人当たりの
 外来通院患者総数
 手術が施行された患者における
 肺血栓塞栓症の予防対策の実施率
 手術が施行された患者における
 肺血栓塞栓症の院内発生率
 出血性胃・十二指腸潰瘍に対する
 内視鏡的治療(止血術)の施行率
 人工膝関節置換術手術後3日以内の
 早期リハビリテーション開始率
 大腿骨頸部骨折地域連携パスの使用率
 退院時共同指導の実施率
 介護支援連携指導の実施率
 術後感染発症率
 脳卒中地域連携パス使用率
 平均在院日数
 がんステージ別入院患者割合

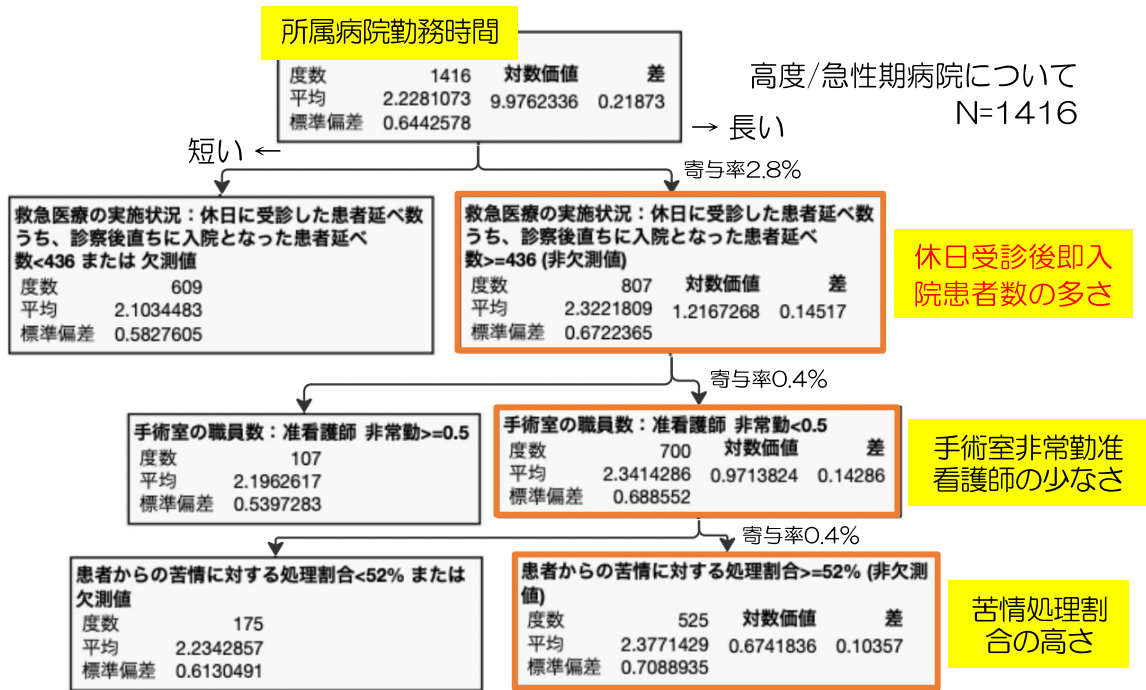


図3. 所属病院勤務時間を分類する病院特徴に関するパーティション分析

5 おわりに

5.1 結論

本調査は2024年4月に施行される医師の働き方改革に向けて、恩賜財団済生会で常勤医師の働き方を把握するために実施された。医師の働き方改革は、勤務医師の時間外労働時間の上限を年間960時間とすることや、面接指導により勤務医師の健康確保を目指すことなど、労務管理を中心として医師の働き方の適正化を遂行することとしている。本研究は恩賜財団済生会76病院に所属する常勤医師1468名から無記名自己記入式質問紙調査で回答を収集した(回答率35%)データであり、常勤医師の長時間勤務に影響を与える病床機能や病院特性の違いを分析し、医師の健康確保や時間外労働時間の規制などの労務管理の検討材料とすることを目的に分析を行った。

パーティション分析で解析した結果、健康確保と関連が高い勤務状況において、長時間勤務には、最短インターバルが短いこと、自発的研鑽時間が長いこと、夜間オンコール回数が多いこと、指示された活動が多いことが関連していることが明らかとなった。特に、最短インターバルが短いことに対しては健康確保のために労務管理を行う必要があるといえる。

さらに、高度/急性期病院では、休日受診後即入院患者数の多さ、手術室非常勤准看護師の少なさ、苦情処理割合の高さが長時間労働の特徴である。特に、休日受診後即入院患者数が多いという実態に対してどの程度、時間外労働規制が実施可能か労務管理を検討することが効果的であるといえる。医師の健康状態が保たれ、職務満足度を向上するとともに、質の高い医療を永続的な形で提供できるように労務管理を検討する必要がある。

5.2 今後の課題

● 調査

今回の調査においては、医師の所属勤務時間や兼業先勤務時間等は自己申告となっており、客観的に正確に把握されていないため、今後はタイムカードなどで記録されたデータを収集する。また今回の調査では、常勤医師の所属部署を集計できていない。今後は、長時間労働が指摘されている、救急、産婦人科、外科や若手の医師等に焦点を当てた調査を実施する。働き方の実態の把握をした上で、健康状態の確保や職務満足度の向上を検討する。医師の専門性や能力、病院としての労務管理や労働時間短縮の取組についてのデータも収集する。

さらに、2024年医師の働き方改革が施行された後に同様の常勤医師の勤務実態の調査を実施する。医師の働き方の変化と職務満足や健康状態の変化を見ることで改善度合いを把握し、今後の対策を検討したい。

● 分析

今回の研究は質問紙調査による医師の評価・感想・意見という主観的なデータに基づいて行ったものである。今後は、常勤医師の所属部署や兼業を含む労働時間を客観的に集計したデータを合わせて分析することで、より現実的な労務管理を行うための考察を行う。また、非階層クラスター分析などの新たな解析手法を用いて、医師の働き方の類型化を行い、より深い考察を行う。

謝辞

本研究を進めるにあたり、分析・解釈の点でご支援いただいた慶應義塾大学健康マネジメント研究科山内慶太教授、慶應義塾大学講師吉村公雄先生、統計数理研究所客員教授の高橋武則先生に感謝いたします。

参考文献

Donabedian A. Evaluating the quality of medical care. *Milbank Memorial Fund quarterly*. 1966; 44 (3), Pt2: 163–203.

恩賜財団済生会, 平成29年度医療の質の評価・公表推進事業における臨床評価指標, https://soken.saiseikai.or.jp/clinical_indicator/pdf/H29/H29_noDPC_all.pdf (2023年12月4日閲覧)。

吉村 公雄ら. 病院医師の職場満足度に影響を与える要因に関する研究—「済生会病院医師の働き方の実態と今後の在り方に関する研究」第2回医師調査のデータを用いた解析—. 済生会総研. 2022 Jun; 2: 26–33.

厚生労働省, 医師・歯科医師・薬剤師統計令和2年度 医師・歯科医師・薬剤師統計の概要, <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/ishi/18/dl/kekka-1.pdf> (令和4年10月11日閲覧)。

厚生労働省, 令和4(2022)年医療施設(動態)調査・病院報告の概況, <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/iryosd/22/dl/02sisetu04.pdf> (令和4年10月11日閲覧)。

厚生労働省, 第12回 医師の働き方改革に関する検討会 医師の研鑽と労働時間に関する考え方について, <https://www.mhlw.go.jp/content/10800000/000404613.pdf> (令和4年10月29日閲覧)。

PDCA サイクルに基づくコイン射撃を用いた
能動型データサイエンス教育- 問題解決と課題達成 -
“Active Data Science Education using Coin Shooting based on the PDCA
Cycle: Problem-solving and Issue Achievement”

小川 昭¹ 高橋武則²

Akira OGAWA Takenori TAKAHASHI

【要旨】

従来のデータサイエンス教育は、主に所与のデータを分析し、その結果を考察する受動型であった。今後は、受講生が自ら解決すべき問題を取り上げる、あるいは達成すべき課題を設定することにより、自らデータを収集、解析して、最後に問題解決や課題達成の成果を自らデータで確認する能動型学習が必要になる。このための教材は受講生自身による作成と操作が可能である必要がある。また実物教材を用いて仮説検定等を能動的に学ぶことも重要である。しかし多くの場合その学習は困難である。その理由の1つは、生成されたデータのばらつきや目標からの乖離が大きいためである。そこで本研究では実物教材としてコイン射撃を提案する。そのデータばらつきをPDCAサイクルにより改善する。

ばらつき改善により、射撃機（カタパルト）間の距離のばらつき、および距離の平均値の違いをそれぞれ検定で確認する。検定にはJMPを使用し、受講生には必要最小限の数理統計知識があればよいとする。最後に課題達成の能動型学習としてビリヤード射撃を提案する。これは標的コイン(TC)を弾丸コイン(BC)でぶつけて目標位置に停止させるものである。最初は近距離に置いた1個のTC、次は近距離に置いた2個のTCで、更には遠距離に置いた1または2個のTCで行う。これら課題の達成には射撃機の開発・改良、射撃法の工夫と標準化、TCの正確な設置、さらに射撃に係る作業員たちのチームワークが必要であり、その過程で統計的アプローチの活用が不可欠である。これら一連の活動を通して能動型データサイエンス教育を行う。

【キーワード】 問題解決, 課題達成, 能動型学習, PDCA サイクル, コイン射撃

¹ 小川 昭 (Akira OGAWA) 目白大学

² 高橋 武則 (Takenori TAKAHASHI) 統計数理研究所

【Abstract】

Conventional data science education has been primarily passive, involving the analysis of given data and discussing its results. However, in the future, an active learning approach will be necessary, where students take problems they need to solve or set issues they must achieve. They will collect and analyze data themselves and finally confirm their problem-solving or issue-achieving outcomes through data. For this purpose, educational materials need to be created and manipulated by the students themselves. Additionally, actively learning hypothesis testing and such using real-world materials is crucial. However, often, this type of learning is challenging and difficult. One of the reasons is the substantial deviation of generated data from the target or high variability.

Therefore, this study proposes using a physical activity, coin shooting, as a real-world teaching aid, aiming to improve data variability through the PDCA cycle. By enhancing variability, we will verify, through testing, the differences in distance of shot coin variability between shooting machines (catapults) and differences in the mean distance. JMP will be used for testing, requiring students to have minimal statistical knowledge. Finally, as an active learning task for achieving objectives, billiard shooting is proposed. This involves hitting target coins (TC) with bullet coins (BC) to stop them at designated positions. Starting with one TC placed at close range, then two TCs at close range, and finally one or two TCs at a distance. Achieving these tasks necessitates the development and refinement of shooting machines, innovative and standardized shooting methods, precise TC placement, and effective teamwork among personnel involved in shooting. Statistical approaches are essential throughout these processes. The entire sequence of activities aims to conduct active data science education.

【Key words】 Problem solving, Issue achieving, Active learning, PDCA cycle, Coin shooting.

1. はじめに

1.1 研究背景

現代は情報通信技術（ICT）が高度に発達し、情報の生成や受発信に関して個人が能動的な存在となった。一方、科学（サイエンス）教育は受動的になり易いが、ビジネスやマネジメントも対象とするデータサイエンスの分野では、データの生成も含め能動的であること、その活動も自主的で能動的であることが望ましい。

さらにデータサイエンスでは、データを収集、解析して、得られた知見を問題解決や課題達成に活用する能動的人材が求められる。解くべき問題や課題を設定 (Plan)、データを収集 (Do)、解析 (Check)、改善 (Act) し、失敗を恐れず、PDCA サイクルのスパイラルアップに能動的に取り組む重要性はますます高まっている。

一方ビジネスの場においては不確実性のもとでも良好に機能する数理モデルを構築し、これを利用することが多い。しかしモデルのパラメータ数がデータ数と比較して多い場合などでは、統計的品質管理の手法がそのまま適用できない場合がある。このため、統計的品質管理手法を基礎としたビジネスの場で有効となるデータサイエンスの方法論を研究する必要がある。また統計的品質管理の主体であった生産技術者がデータサイエンティストとしてスキルアップするための要点も理解する必要がある。データサイエンスを取り巻く環境の概要を図 1 に示す。

また業務を定常業務とプロジェクト業務に分けて分析するアプローチがある。定常業務では、情報は日常的に得られるものであり、その前提条件のもとで定常業務が成り立つ。そこで使用される代表的な管理手法はビジネスデータサイエンスにおいても活用できる。一方プロジェクト業務における情報は、恣意的、計画的に収集されることが多い。この場合、情報は実験計画法などで収集され、分散分析等の統計手法が大きな力となっている

1.2 先行研究

データサイエンス教育には座学教育と実技教育がある。座学教育では Kume ら[3]のテキストが世界的に広く用いられておりその内容は「QC7 つ道具」を中心に基本的な統計的手法を易しく解説している。易しい具体例 (ボールゲーム) を取り上げて統計的推測の基本を解説しているものとして高橋[20]がある。これを発展させたものに高橋[21]がある。これらの更なる発展形として本研究の「コイン射撃」が登場した。

一方で実験計画法 (Design of Experiment) が重要視され、このための教育として早い段階で Box[1]が紙ヘリコプターを用いた教育を提案している。この教育の背景の理論として Box ら[2], Montgomery[5], Myers ら[6], Wu ら[25]の書籍がベースになっている。また実験技術と品質との関係を述べたものに宮川[4]もある。

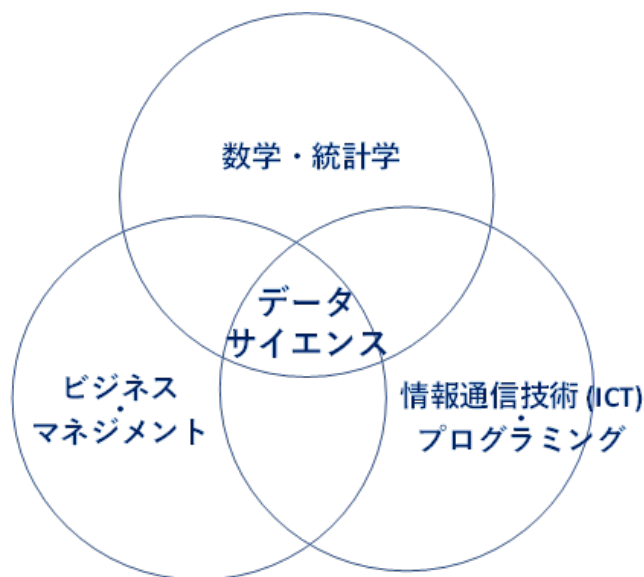


図 1 データサイエンスを取り巻く知識体系

実務において高度な解析を行う場合には多変量解析が重要であり，このための書籍として奥野ら[16]，吉澤ら[26]の書籍が有用である．また工業における多変量データの解析では奥野ら[17]が参考になる．そして実務ではサンプルサイズをどのように決定するかが常に問題となる．このための書籍としては永田[7]が広く利用されている．単に統計的方法が分かったとしてもどれくらいのサンプル数で実施すれば確信の持てる結果が得られるのかを知ることが実務では重要な問題である．

統計的方法とそれを活用したアプローチを本格的に実務問題に適用する観点ではトヨタ自動車グループが日本品質管理学会と連携してまとめた 2 冊の書籍[9]と[10]が実践的で有効である．また統計的方法の実務への適用方法およびその教育方法については小川らの研究[11]，[12]がある．統計的方法を管理や改善に結び付けたものに高橋[19]があり工程管理は仁科[8]が有用である．

なお，企業のエンジニア教育では高度な統計的手法の実践的な理解のためにシミュレーションやシミュレーターを用いた教育が行われている．シミュレーションに関するものとしては吉野ら[27]があり，シミュレーターを用いたアプローチに関するものとしては小川ら[12]がある．模擬生産や模擬実験と統計的品質管理については高橋[22]，[23]，[24]がある．

近年は分かり易くかつ短時間でシステマティックに統計的方法を実技演習で教育することが学校側（小学校，中学校，高校，大学）からも企業側からも求められている．この基本的な考えについては高橋の研究[23], [24]がある．そして，この種の教育を実現する教材として「コイン射撃教材」が注目されている．これに関しては小川らの研究[13], [14]そして[15]がある．また問題解決と課題達成に関するものとして高橋の[18], [20]がある．本研究はこれらをベースにして，問題解決と課題達成を中心とした PDCA サイクルに基づくコイン射撃を用いた能動型データサイエンス教育を論じる．

1.3 研究目的

本研究の目的は，統計的品質管理手法を基礎として，データサイエンスの初心者が，実務での問題解決や課題達成に貢献できるデータサイエンスの本質を学ぶため，実物教材を有効活用する方法論と有用性及び課題点を明らかにすることである．

このとき，実物教材としてコイン射撃を活用し，PDCA サイクルのスパイラルアップに沿って研究を行い，統計的品質管理手法のデータサイエンスに対する有用性を明らかにする．スパイラルアップの概要を図 2 に示す．

1.4 研究の対象と特徴

本研究の対象分野はデータサイエンスであり，対象者は統計解析の初心者である．具体的には，経験の浅い社会人や低学年の学生である．本研究の特徴はデータサイエンスを品質管理の視点で取り組む点にある．品質管理（Quality Control: QC）は既に確立された知識体系であり，その方法論は QC 手法として広く知られている．

さらに品質管理に数理統計学（mathematical statistics）の理論を適用した統計的品質管理（Statistical Quality Control: SQC）はデータサイエンスを取り巻く知識体系に近いと考えている．この方法論を用いて具体的なデータを処理し，結果をグラフにより可視化し，これを考察する．その結果，データ解析技術者だけでなく管理部門や経営者にも意思決定や経営判断を可能とすることも特徴である．

もう一つの特徴は，データの生成に統計的品質管理の教育用に活用されてきたコイン射撃教材を使用した点である．コイン射撃により得られたデータはデータサイエンスのデータとして活用できることを示したことも特徴である．

なお本研究では解析及びグラフ化（可視化）ツールに統計解析ソフト JMP（ジャンプ）を使用した。これは教育受講者が統計解析の初級者であることを想定しているためである。JMP を使用することで、受講者にとって必要な統計知識は最小限となる

2. PDCA サイクルに基づく教育理論と能動型教育の方法

2.1 理論

データサイエンスは図 1 に示すように、数学・統計学、ビジネス・マネジメント、プログラミングを含めた情報通信技術の 3 つの分野にまたがる横断的な研究領域である。各領域それぞれに理論体系があるが、考え方が共通しているところも多い。

このような中で製造業を中心とした品質管理の分野では数理統計学を基礎とした統計的品質管理が確立している。さらにプロジェクトマネジメントの視点においても、計画 (Plan)、実施 (Do)、確認 (Check)、対策 (Act) を PDCA と呼ばれる一連の流れとして取り組む方法論が確立している。その概要を図 2 に示す。

本研究においては統計的品質管理を基礎とした取り組みを大前提としている。その中には従来からの理論を採用しており、数学あるいはマネジメントの領域で新たな理論を提案するものはない。

2.2 方法

スデータサイエンスを取り上げる背景として、その知識や技術を必要とする社会人や学生が多数存在している現実がある。社会人として企業に就職し、新入社員として働き始める時、企業はこれらの社員に適切な教育を施し、社内で戦力となるように計画をたてる。

しかし社会人となる前の学生に実務の場で必要とされるデータサイエンスを教えることは容易ではない。そこで本研究では、企業を中心として統計的品質管理の教育で長く使われてきた実物教材を使用し、そのエッセンスを活かしてビジネスにも適用できるデータサイエンス教育を行う方法を採用する。

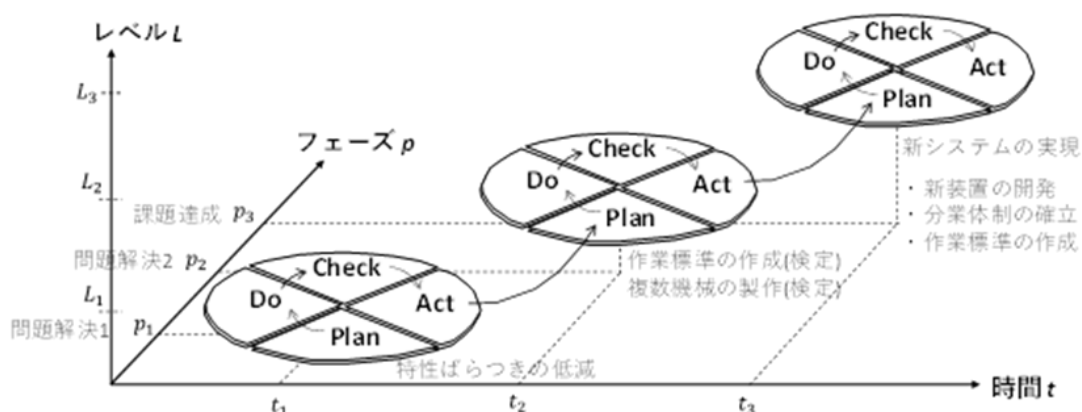


図 2 PDCA のスパイラルアップの概要

さらにプログラミングを含めた情報通信技術の分野では、統計処理に使用する統計解析ソフトウェアの使用を前提としている。すなわち統計解析ソフトウェアで出力される結果をそのまま利用することを前提としている。これはデータサイエンス初心者を対象としており、統計理論を研究対象としていないことが背景にある。

実物教材にはいくつか優れたものがある。代表的なものとして、コイン射撃、紙ヘリコプター、紙グライダーがある。それらの特徴をまとめたものが表 1 である。

表 1 実物教材の比較

| | コイン射撃 | 紙ヘリコプター | 紙グライダー |
|--------|-------|---------|--------|
| 対象者 | 初級 | 中級 | 上級 |
| 準備期間 | 短い | やや長い | 長い |
| 品質管理 | ○ | ○ | ◎ |
| コスト管理 | ○ | ◎ | ○ |
| 納期管理 | ○ | ○ | ○ |
| リスク管理 | △ | ○ | ◎ |
| 測定精度 | ◎ | ○ | △ |
| 総合的難易度 | 易しい | やや難しい | 難しい |

2.2.1 コイン射撃

概略図を図 3 に示す。ここではカタパルトから射撃されたコインの様子が示されている。カタパルトは厚紙でできており、輪ゴムを取り付け、これを引き伸ばして金属製のコインを打ち出す。打ち出されたコインは引き量に応じて机の上にひかれた紙の上を数十センチから 2～3 メートルの距離まで滑走する。

輪ゴムの引き量、コインの種類や重さなど、因子の水準を変えれば距離、すなわち特性も変わる。コイン射撃の最大の特徴は、因子の水準を変えなくても距離がばらつく、すなわち射撃の結果に誤差が生じること、さらにその誤差が目に見えることである。

数理統計学を理解するとき、誤差を学ぶことは必須である。そして、コイン射撃は誤差が目に見える形で理解できる。さらに誤差を小さくするためのさまざまな活動、すなわち改善活動の必要性を理解し、実績させることに適した教材である。

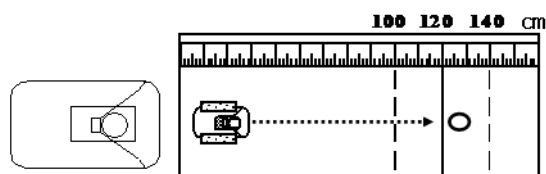


図 3 コイン射撃の概略図（最も基本的なコイン射撃の場合）

2.2.2 紙ヘリコプター

図 4 に紙ヘリコプターの概要を示す。これは紙の台紙からヘリコプターの上翼と下翼を切り出し、それぞれを組立た後に結合し、2つの翼を備えた複葉機である。この下端にクリップを取付け、その個数で重さを調整することができる。この機体を床上 1～2m の高さから自然落下させると自動的に翼が回転し、滞空時間が長くなる。

滞空時間は上翼及び下翼の長さや幅、胴体の長さや幅及びクリップの数（重さ）が関係する。さらには紙質や紙繊維の方向などがそれらの要因と複雑に関係する。紙ヘリコプターの最大の特徴は、これら機体各部の因子と滞空時間との関係を実験を通して解明することができる点にある。

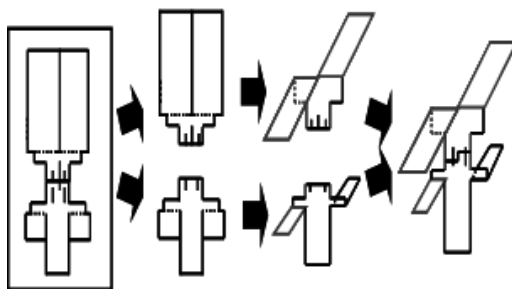


図 4 紙ヘリコプターの概略図（上翼と下翼で構成される複葉機の場合）

2.2.3 紙グライダー

図 5 に紙グライダーの概要を示す。これは1つの胴体と2つの羽を組合わせてグライダーの機体を作成し、解放位置から滑空させ着陸盤に着陸する様子を示したものである。紙グライダーは、小さいものは手のひらに載るほどであるが、大きなものは翼幅が30cmになるものまである。

小さな機体の製作は比較的容易であるが、機体が大きくなるにつれて様々な管理要素が加わる。さらには翼を支えるための補強なども考慮して製作する必要がある。

紙グライダーの最大の特徴は機体の改良とそれに関連した多様な管理方法の導入、その結果としての安定飛行である。飛行を安定させるためには多くの困難が伴い、PDCA サイクルを通じて安定飛行を実現するためには、技術と経験が必要である。この点でコイン射撃とは大きな違いがある

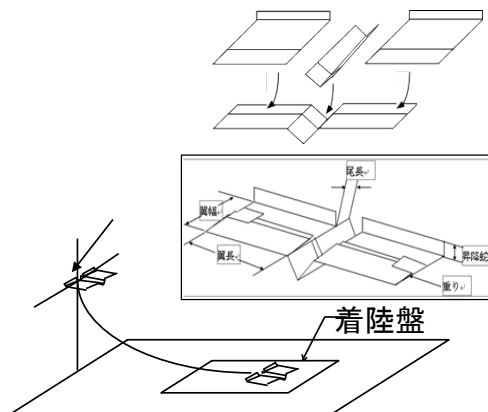


図 5 紙グライダーの概略図（4 部品型の場合）

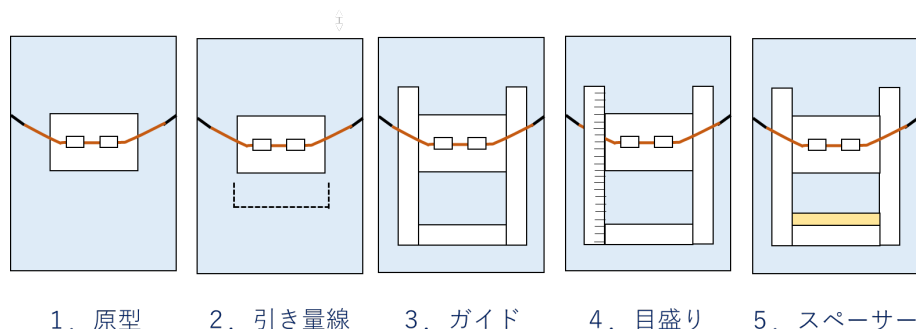


図 6 カタパルトの段階的な改善

2.2.4 本研究で用いるコイン射撃教材

代表的な実物教材として、コイン射撃、紙ヘリコプター、紙グライダーの 3 点を紹介した。この中で、理解が容易でかつ受講生自らが簡単に製作・改良ができ短時間に多数のデータを効率よく収集できる点でコイン射撃は誰でも扱うことのできる教材である。したがって、3 点の実物教材の中で最初に選択する教材として最も適している。フックの法則に基づいてコインが平面上を滑走するシンプルなメカニズムのため初等・中等教育の場でも活用可能な教材である。

データサイエンスを教育する場合、データの生成過程はブラックボックスではなく、誰にでも容易に理解し把握できることが望ましい。特に初級者は、生成過程が「見える化」されていれば、PDCA サイクルを理解し発展的に学習する、すなわちスパイラルアップすることができる。

また実物教材は、その設計、製作、維持管理、改良、治具開発も重要である。そして研究及び教育のレベルに応じてこれらのレベルも調整できることが望ましい。初期のカタパルトを段階的に改善して最終的には作業者にも依存しない（作業者が変わっても常に同じ射撃ができる）カタパルトを実現すればばらつきは射撃性能は大きく改善される。その概要を図 6 に示す。左から順に 1. 原型、2. 引き量線、3. ガイド、4. 目盛り、5. スペーサーを示している。スペーサーを使用したカタパルトであれば誰でも容易に安定した射撃が可能となる。

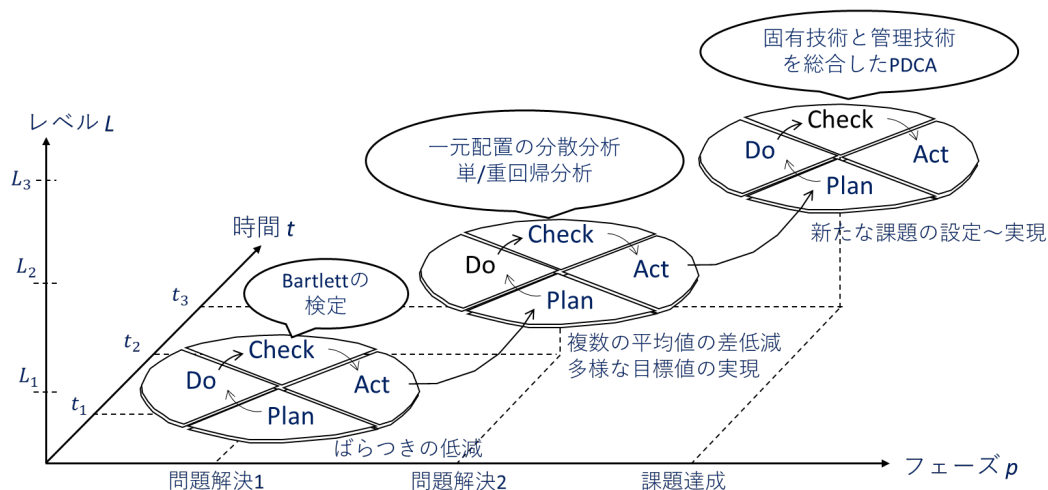


図 7 本教育での PDCA スパイラルアップの概要

2.2.5 PDCA サイクルとスパイラルアップ

PDCA サイクルが 3 段階にスパイラルアップしているイメージを図 7 示した。第一段階はばらつき低減である。具体的にはカタパルトを段階的に改善してゆくことである。

第二段階は複数の平均値の差の低減である。これは第一段階でばらつき低減が成功し、回帰分析の結果、多様な目標値の実現が可能となった状態である。

第三段階は新たな課題を設定しこれを実現することである。課題の設定は新たな開発と結びついて従来とは一段レベルが向上したものとなる。この課題を達成するための開発は、装置などのハード面だけでなく、作業方法も含めたソフト面、さらには作業者のチームワークやチーム構成なども考慮したマネジメントにも及ぶものである。これらをコイン射撃教材を用いて能動的に学習し、その有効性を示す。

3. コイン射撃における飛距離ばらつき問題の解決

3.1 距離ばらつきについて

カタパルトを段階的に改善し、ばらつきの低減が実現した後、異なる複数のカタパルトで射撃されたコインのばらつきに違いはないか、分散の同等性を検定により確認する。等分散性の検定をきちんと学ぶことは初心者にとってかなりハードルが高く、初心者にとってこれを学ぶ過程で検定を活用しようという意欲は喪失し脱落する人が圧倒的に多い。

したがって、汎用的に活用できる Bartlett の検定の使い方・読み方を理解した上で、それを用いて統計的に妥当な判断をするというアプローチが現実的であり実践的である。

近年のコンピュータソフトウェアは、データの様子を表示する図と、検定結果を見易く出力してくれるのでこれを正しく使えるようになれば良い。ソフトウェアの具体例として”JMP”の出力を示すが、正しく使用すれば出力される解析結果は直ちに直感的かつ容易に理解できるものである。

”JMP”によるコンピュータ処理ではデータの様子を分かり易く見せてくれる図が出力され、さらに判定結果を出力してくれるので、これを正しく使えるようになれば良い。大事なことは、PDCA サイクルを回す過程でコンピュータソフトを正しく使用し、統計的チェックを行い、これを正しく解釈するということである。

3.2 結果と解析

3 台のカタパルトでそれぞれ 25 回射撃した結果を図 8 に示す。またそのデータを図 9 に示す。飛距離の平均は 1 号機と 2 号機がほぼ同じ、3 号機は 1, 2 号機より飛距離が大きい。ここではまずばらつきを解析する。3 台のカタパルトともばらつきはほぼ同じように見える。

このデータを JMP に入力し一元配置で図示し、さらに Bartlett の検定の結果を示したものが図 10 である。水準 1, 2, 3 はカタパルトの番号であり 25 回の飛球の結果が散布図で示されている。各水準の 25 点の広がりやばらつきを示している。飛距離のばらつきは標準偏差でそれぞれ 5.996, 5.113, 6.938 である。

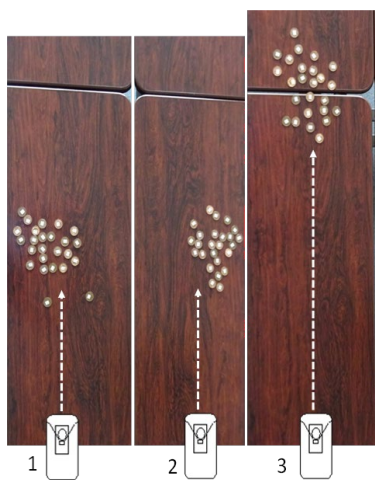


図 8 コイン射撃の結果

| カタパルト | | | |
|-------|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 126 | 134 | 153 |
| 2 | 123 | 129 | 160 |
| 3 | 136 | 127 | 162 |
| 4 | 140 | 129 | 150 |
| 5 | 128 | 127 | 155 |
| 6 | 127 | 127 | 153 |
| 7 | 132 | 128 | 157 |
| 8 | 121 | 124 | 165 |
| 9 | 125 | 118 | 152 |
| 10 | 123 | 120 | 147 |
| ~~~~~ | | | |
| 20 | 138 | 125 | 160 |
| 21 | 131 | 115 | 166 |
| 22 | 127 | 130 | 171 |
| 23 | 128 | 133 | 167 |
| 24 | 119 | 120 | 156 |
| 25 | 127 | 123 | 163 |
| 平均値 | 128 | 124 | 159 |

図 9 コイン射撃の飛距離データ

これを基に図 10 において Bartlett の検定結果を赤枠で示す. 検定統計量としての F 値は 1.085 であり, P 値は 0.3378 である. この数値は危険率 1% (0.01), あるいは 5% (0.05) より大きく, 有意であるとは言えない. すなわちカタパルトの違いによる分散の違いがあるとは言えないことが判明した.

本研究で採用した等分散性の検定 (Bartlett の検定) については, 受講者がこの検定を理解して行うことは難しい. 本研究では JMP を利用してその結果を吟味し, PDCA サイクルの Check を行うことで能動型の学習とすることができた.

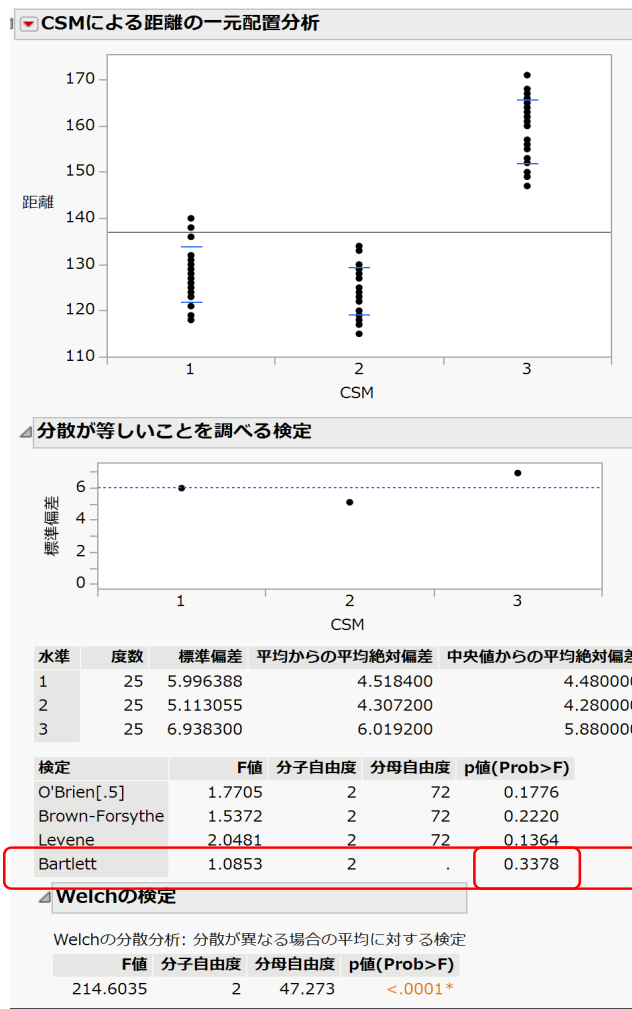


図 10 データの図示と等分散性の検定（Bartlett の検定ほか）の結果

ばらつき原因の候補の1つとしてコインの品質ばらつき（コインの質量と形状のばらつき）が考えられる。しかし、コインはその品質は極めて高く変形したコインでない限りは無視して良い。射撃者が一人で射撃に慣れた後ではむしろ原因としてハード（輪ゴムの選択、厚紙の工作、輪ゴムの掛け方）やシステム（作業分担）を検討するとよい。輪ゴムの場合は一定の引き量を設定しても、解放時のエネルギーは様々な原因でばらつくと考えられる。

飛距離のばらつきを Bartlett の検定で評価しばらつきの違いがあるとはいえないという結果から、ソフト（射撃方法）には問題はなくハードのどこかに問題があることになる。最も考えられる原因は輪ゴムの強さ、すなわちバネ定数の違いが考えられる。

4. コイン射撃における目標距離からのずれに関する問題の解決

4.1 目標距離からのずれについて

ばらつきの違いがあるとは言えない状況、すなわちばらつきの問題が解決した状況で、次に解決すべき問題は目標とする値からのずれである。すなわち飛距離データの平均値が目標値からずれているかを検定で確認することになる。

ここでは3台のカタパルトで25回射撃したときの飛距離の平均値を算出し、その平均値を目標値として、カタパルト3台の飛距離の平均値がに違いがあるか解析する。詳細な理論は要求せず、教育受講者にはJMPの出力を理解できればよいとしている。JMPは視覚的に理解できるため本教育に適している。

4.2 結果と解析

結果を図11に示す。25回の飛球の結果が散布図で示されていることは図10と同様であるが、各水準の平均値と95%の信頼区間がひし形で示されている。誤差の標準偏差が6.062であり、正規分布を仮定して表示されている。

水準1と水準2とはひし形が重なっており、両者の平均値に違いはないと見える。しかし水準3の平均値は水準1及び水準2から大きく乖離しており、平均値は異なるものと見える。カタパルトを示すCoin Shooting Machine (CSM)のF値は244.7であり、p値は0.001未満である。すなわち3つのカタパルトの平均値は同じとはいえないことを示している。

3台のカタパルトから射撃された飛距離の平均値はそれぞれ127.96, 124.32, 158.84であり、全体の平均値は137.04である。1,2号機の平均値は小さく、3号機の平均値が大きいことも散布図から明らかである。F値は図6から244.74であり、またp値は0.01未満、すなわち1%以下で有意であることが示されている。

3つ並んだ散布図を見れば、3号機の平均値が他2台の平均値より大きく、平均値に違いがあることは目視レベルでの判断でも明らかである。そのうえで科学的に判断するため統計を活用して検定を行い客観的な判断を行っている。統計的には一元配置分散分析を行っていることになるが、受講者はその詳細を理解する必要はなく、本教育ではその結果を理解できればよい。

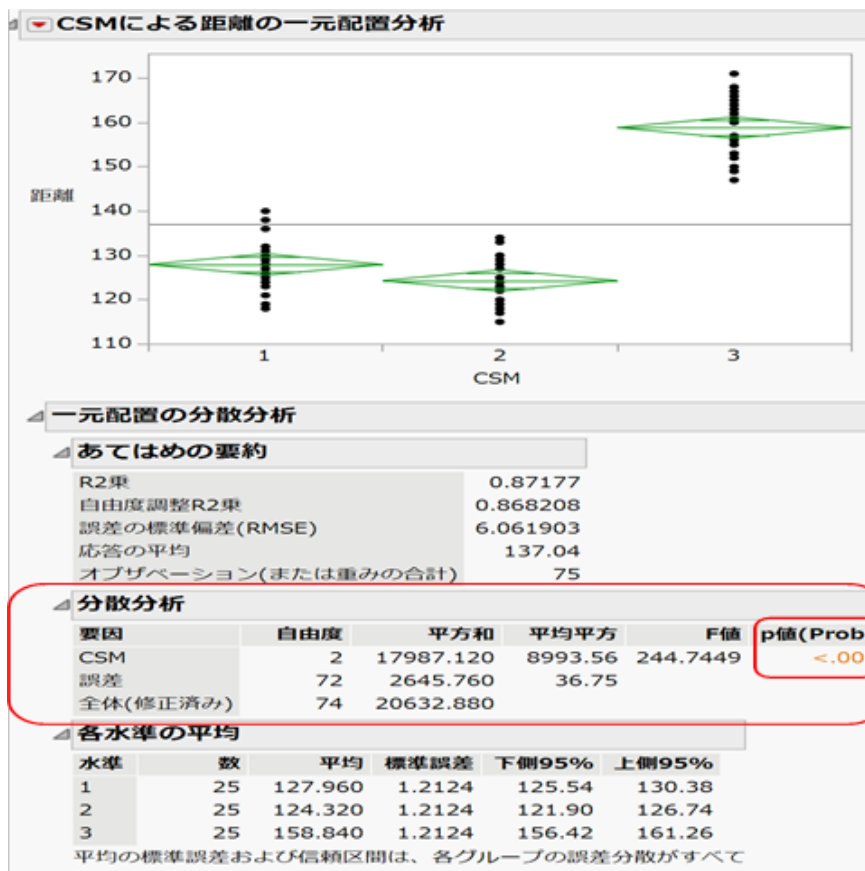


図 11 一元配置の分散分析の結果

平均値の違いの原因は、例えば輪ゴムの張力の違いが考えられる。すなわち3号機の輪ゴムは1, 2号機と同じ引き量であってもゴムの密度の違い等の理由から蓄えられているエネルギーが大きいと考えられる。

簡単に確認する方法として、各輪ゴムに同じ重さの重りを取り付け、その伸びる長さを比較する方法がある。3号機は1, 2号機より伸びる長さは短いと予想される。このような確認方法も実物教材を使用すれば容易に実行できる。

そのような理由から、今後の改善活動としては、このような輪ゴムの検査を事前に行い、同じ性能の輪ゴムをカタパルトに取り付けること、が考えられる。カタパルトの製作と検査のための手順書（作業標準と検査標準）があれば歯止めになり、実務に応用すれば実務での改善につながる。

5. あらたな課題としてのビリヤード射撃

5.1 ビリヤード射撃とは

ビリヤード射撃の概要を図 12 に示す。射撃機と弾丸コインは従来と同様であるが、これに加えて標的コインを 1 つまたは 2 つ設置することに特徴がある。そしてビリヤード射撃は射撃のばらつきや飛距離の平均値のコントロールが完了した後、すなわち問題が解決した後に行う課題達成型の射撃となる。

課題達成 1 は、1 つの標的コインを目標値に入れること、である。その後目標達成 2 は、2 つの標的コインを目標値に入れること、である。そして最終課題達成は、3~4m 先の標的コインを目標値に入れること、である。これらの総称してビリヤード射撃と呼ぶ。

課題 1 及び課題 2 は従来のカタパルトを使用して実施するが、最終課題を達成するためには新たな長距離カタパルトの開発が必要となる。さらに標的コインをセットする時、何らかの工夫が必要となる。このための治具の開発も必要となる。

さらにビリヤード射撃は一人で実施することは困難であり、チームを構成してチームワークも重要となる。これらは組織開発につながるものである。

すなわち治具に代表されるハードと組織に代表されるソフトの両方の開発が重要となる。これらの開発を経た後、複数の組織（チーム）が一定時間内にコインを射撃し、目標値に入ったコインを得点として、チーム対抗のゲームを行うことも可能である。さらにチームの人員を削減し、経営的な最適化を検討することも可能である。

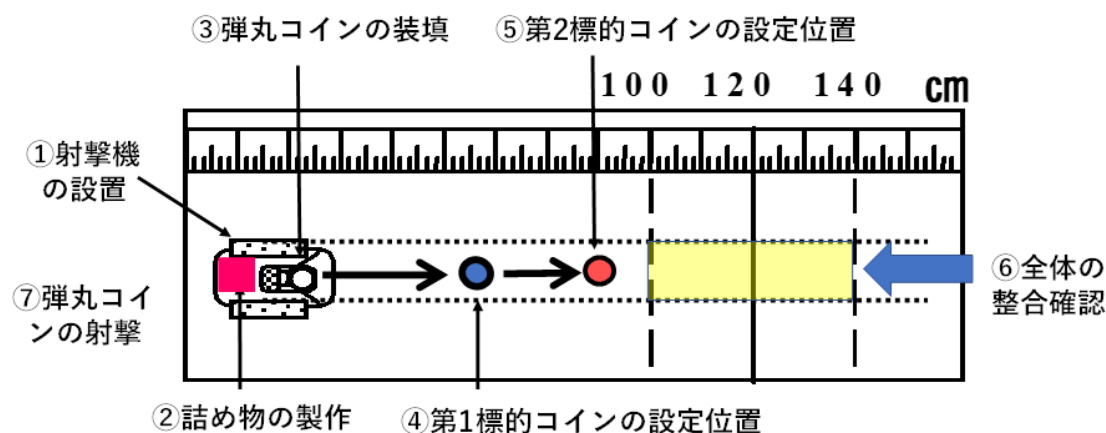


図 12 ビリヤード射撃の概要（標的コインが 2 個の場合）

5.2 ビリヤード射撃に必要な3つの要素

5.2.1 長距離射撃機の開発

従来の射撃機（カタパルト）に延長して取付け、3～4m先の標的コインを正確に射撃することのできる長距離の概要を図12に示す。これはカタパルトの先端に長い銃身を取付けるため銃身ガイドを伴ってセットされている。これにより長距離を安定して射撃できるようになる。

5.2.2 標的コイン位置決めガイドの開発

ビリヤード射撃では標的コインをカタパルトの2～3m前方にセットする。このときコインだけを都度セットするのではなく、あらかじめ最適にセットされた位置決めガイドを使用すれば、多数回の射撃においても、短時間に標的コインをセットすることができる。その概要を図14に示す。

位置決めガイドは、まず定規を用意し、その上面に割りばしまたは厚紙を定規と直角になるように取付ける。これを弾丸コインの軌道に沿って配置し、標的コインを設置するときのガイドとして使用する。図14では標的コインを1個設置する様子を示すが、2個の場合も同様である。

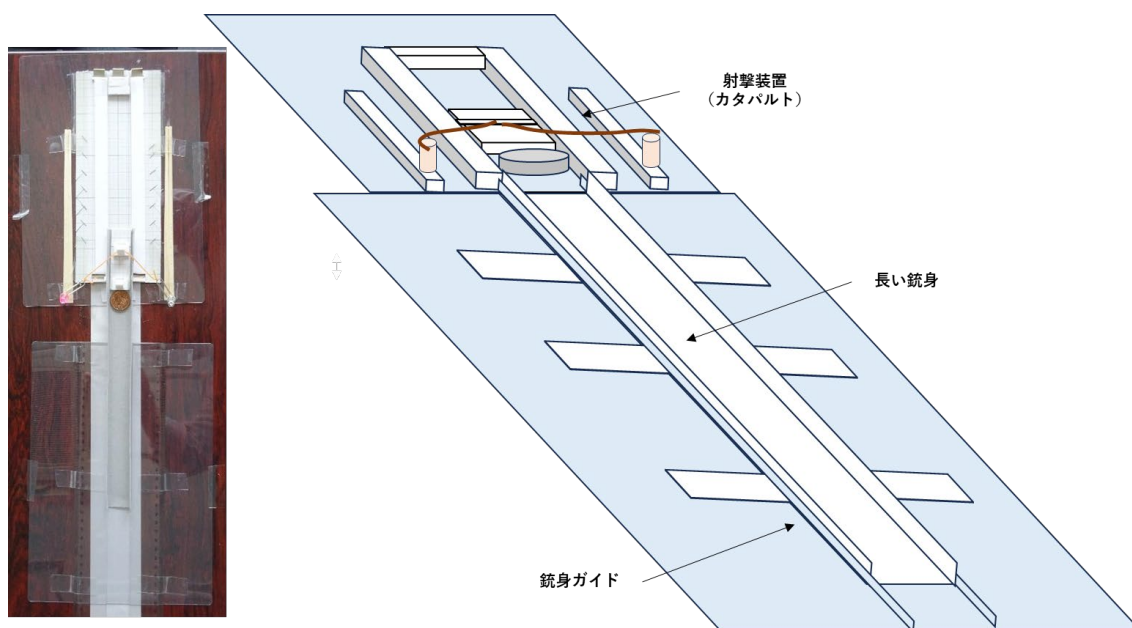


図13 長距離ビリヤード射撃に使用する長距離射撃機

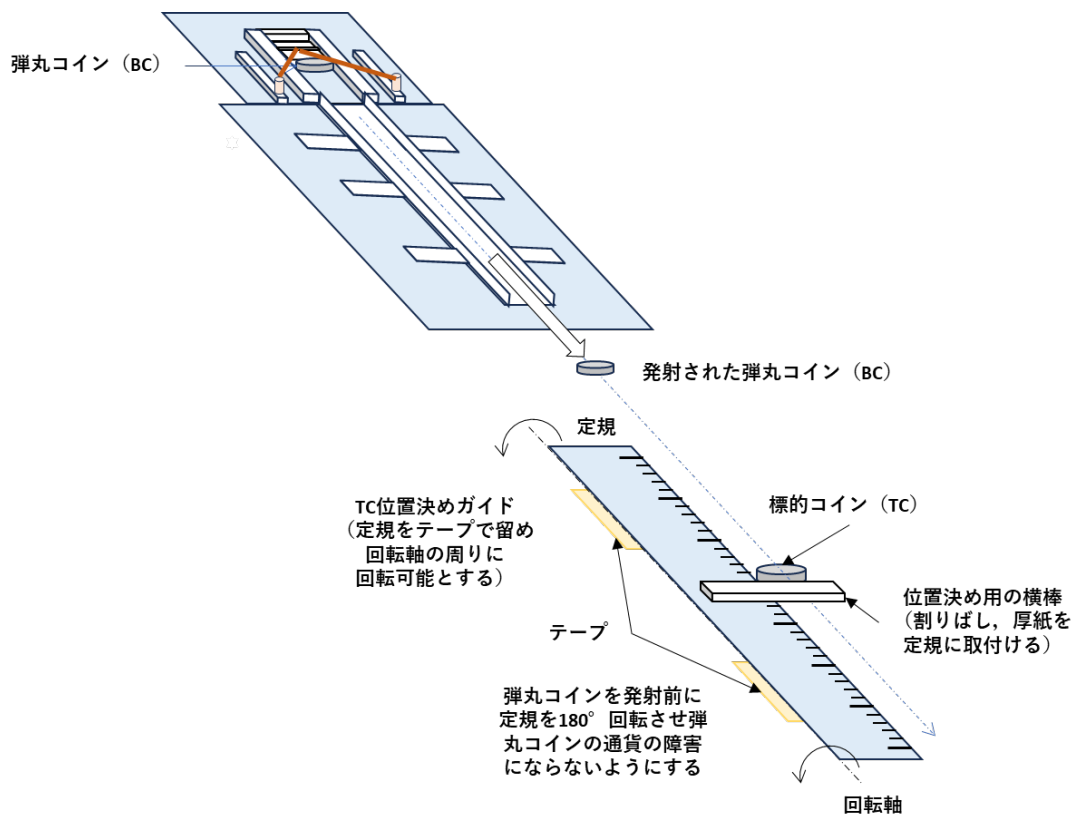


図 14 標的コイン位置決めガイドをセットした様子

5.2.3 ビリヤード射撃を行うための組織づくり

長距離射撃機と標的コイン位置決めガイドを開発後、それらを設置してビリヤード射撃を行う様子と図 15 に示す。この中には[1]射撃, [2]射撃サポート, [3]第一標的コイン設置, [4]第二標的コイン設置, [5]コイン整合確認, [6]距離計測, [7]記録, [8]コイン回収の各作業を担当する作業者が配置されている。

これらの作業により、多数のコインを円滑に射撃する体制組織が構築された。しかしいくつかの作業を 1 人の作業者が兼任することができれば組織はスリム化され人件費も抑えられ経営的にも望ましい。その場合兼任できる作業は[1][2], [3][4][7][8], [5][6]であり作業者は 3 人で可能となる。このようなスリム化は作業者の多能工化が実現して初めて可能であり、職場組織の方針も関係する。従来からのコイン射撃とビリヤード射撃及び改良型ビリヤード射撃の作業者の数を図 17 に示す。作業内容を精査すれば最適な組合せは他にも考えられる。

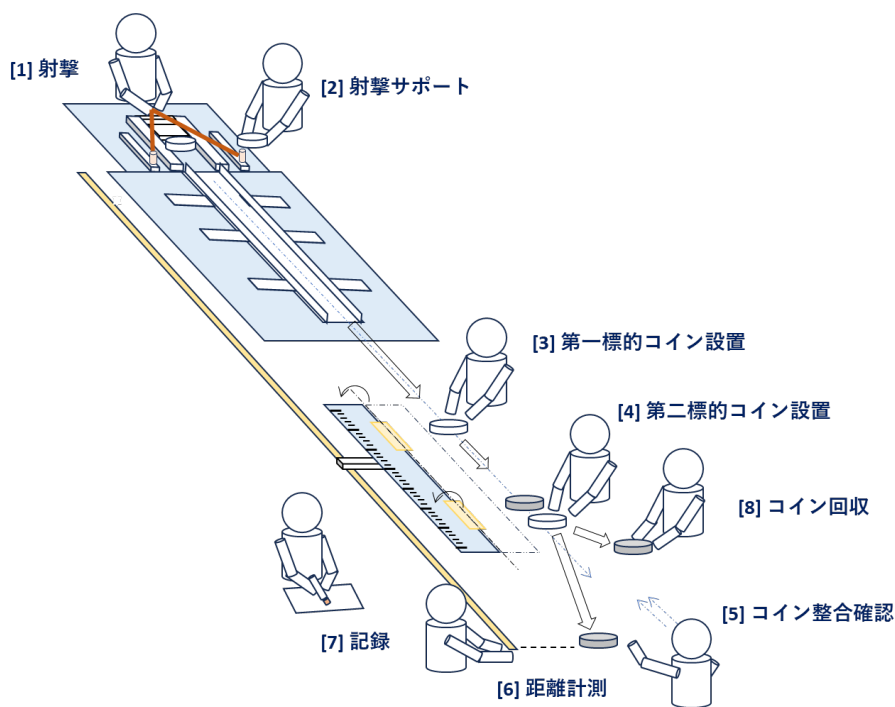


図 15 8人態勢でビリヤード射撃を行う様子

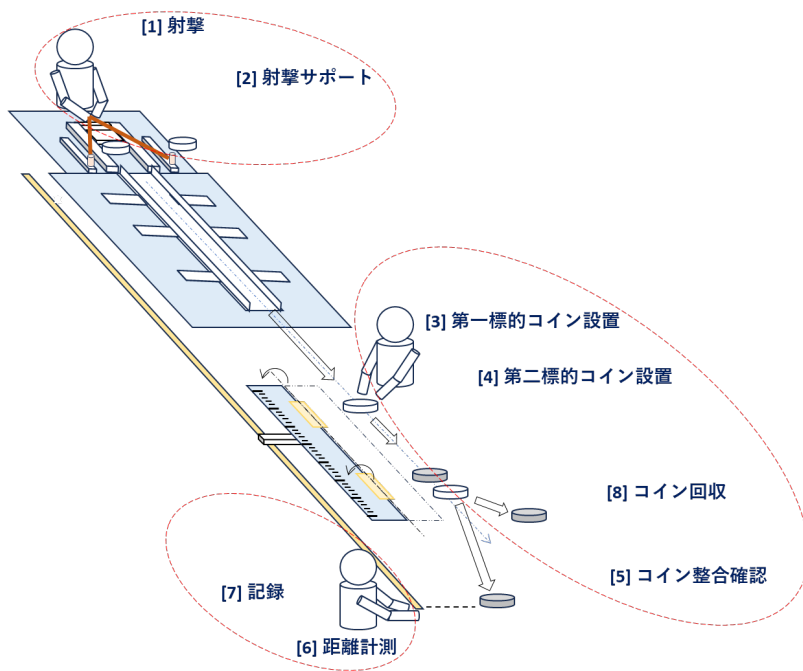


図 16 3人体制でビリヤード射撃を行う様子

| | [1] 射撃 | [2] 射撃サポート | [3] 第一標的 コイン設置 | [4] 第二標的 コイン設置 | [5] コイン 整合確認 | [6] 距離計測 | [7] 記録 | [8] コイン 回収 | 合計人数 |
|--------------------|---|---|---|---|---|--|---|---|------|
| コイン射撃 |  |  | | | | |  |  | 5 |
| ビリヤード射撃 |  |  |  |  |  |  |  |  | 8 |
| 改良型 ビリヤード 射撃 |  | |  | | |  | | | 3 |

図 17 コイン射撃及びビリヤード射撃における作業者の人数

5.3 従来からのコイン射撃

従来からのコイン射撃では標的コイン関連および射撃コインと標的コインとの整合確認の3人が不要である。そこで合計人数は5人となる。さらに射撃サポート、記録、コイン回収も1人で対応でききれば3人少ない2人で作業することが可能である。

これらの人間配置は、例えばコイン射撃の競技会を開催すれば、そこから大きなフィードバックを得て、さらに改善に取り組むことができる。

5.4 長距離でのビリヤード射撃

長距離ビリヤード射撃では長距離射撃機とコイン設置治具の完成が非常に重要である。初めは8人の組織を形成し、その後作業者の多能工化を進めれば、最終的には3人での射撃も可能となる。そのような訓練を教育プログラムに加えることも可能であり必要である。

いずれにしてもビリヤード射撃は多くの困難を伴うものであり、教育受講者はPDCAサイクルに従ってさまざまな改善を実施し、効果を確認することが可能である。

5.5 問題解決と課題達成について

コイン射撃の問題は飛距離のばらつきと平均値のずれであり、この問題を解決することが最初のPDCAサイクルの目標であった。さらにスパイラルアップしてビリヤード射撃を行い組織構築も含めた課題の達成に取り組むことになった。これはPDCAサイクルの最終サイクルとなるものである。

6. 考察

6.1 ばらつき低減について

統計的品質管理においてはばらつきの改善が最優先される。平均値は調整により目標値に合わせ込むことが可能である場合が多いからである。ビジネスデータサイエンスにおいても、データが生成される環境が製造業と同じであれば、この原則も維持できる。

コイン射撃の現場ではばらつきの原因は主にカタパルトにある。その改善ステップは改善のない初期型から停止位置の明示、ガイドの取付、目盛りの取付、スペーサーの取付を5段階を提示した。この改善に合わせてばらつきも改善されることを受講者は実感することができる。

実際のビジネス現場においては測定のばらつきが問題となることもある。コイン射撃ではコインの発射位置から停止位置までを測定する。このときコインは停止しているため測定のばらつきはほとんど無視できる。

仮に紙ヘリコプターを教材として使用した場合、その滞空時間を測定することになる。これは上空から発射（解放）され床面に着地するまでの時間を作業者がストップウォッチで手動測定する。発射と着地の時間を手動で正確に測定することは困難である。データサイエンスにおける測定の重要性を研究する場合は紙ヘリコプター教材が適切であるが、これはコイン射撃教材の次のステップで使用する事が望ましい。

6.2 目標値からのずれについて

6.2.1 検定について

ばらつきの違いや平均値の差を検定することは統計的品質管理ではしばしば行われる。正確には仮説検定と呼ばれ、帰無仮説が棄却されるか、それに続けて対立仮説を設定した場合、対立仮説が採択されるかを計算で求めるものである。

帰無仮説の棄却には第1種の危険率、対立仮説の棄却には第2種の危険率を定め、そのために必要なデータ取得の試行回数を求めることも必要となる。

本研究ではばらつきの違いや平均値の差を検定するとき、第1種の危険率を5%として検定を行った。この数値は統計解析ソフト（JMP）が出力するためこれを利用すれば初心者でも容易に検定を行うことが可能である。

さらに検定の種類も複数あり、本研究においてはばらつき（等分散性）は Bartlett の検定、平均値の差は分散分析による F 検定を用いた。いずれも JMP を使用し、その検定手順に誤りがなく結果を正しく解釈すれば初心者でも問題なく検定ができる

6.2.2 回帰分析について

コイン射撃の目標値はコインの滑走距離である。その滑走距離を決めるものは、カタパルトの引き量およびコインの重さである。これは初心者でも容易に理解できるため、コイン射撃は教材として適している。紙ヘリコプターの滞空時間は多くの因子が関係し、紙グライダーの滑空ではより複雑なメカニズムが働くため初心者を対象としたデータサイエンスの教材には適していない。

コイン射撃においてもコインは 1 種類に限定し引き量だけを変えれば単回帰分析となり、引き量とコインの重さの 2 つを変えれば重回帰分析を行うことが可能となる。重回帰分析ではコインの重さを 1 円玉の個数で変化させ、その数をパラメータとして距離データを取得し、回帰直線を作成した。このときグラフに示された直線の傾きを目視で精査すると 1 円玉が 0 枚（軽いコイン）の傾きは 4 枚（重いコイン）の傾きより急峻であることが判明した。これはコインと滑走面との摩擦の影響である。すなわち軽いコインに働く摩擦力は小さく、重いコインに働く摩擦力は大きいことが原因である。

データサイエンスにおいても得られたデータを吟味し、外れ値や欠測地の存在に対処することが重要である。さらに物理や化学などの自然科学法則にも注意を払いその法則に従ってデータを処理することが重要であることは間違いない。

一方でビジネスにおけるデータサイエンスを考える時、データ分析の担当者は自然科学の専門家ではない。さらに本研究の対象となるデータサイエンス初心者は、引き量と距離は比例することを前提にデータ処理を行っている。そのため重回帰分析におけるコインの重さと直線の傾きの関係は無視した。この点については今後の課題で言及する。

6.3 ビリヤード射撃による課題達成の取組み

6.3.1 ビリヤード射撃について

問題が解決した後、当初はその実現が困難であった課題を達成することが可能であることを学習することができる。すなわちビリヤード射撃は問題解決後に初めて取り組むこと

ができる課題であった。

6.3.2 問題解決と課題達成

統計的品質管理では問題解決と課題達成を明確に区別している。問題に対する解が存在する場合には「あるべき姿」があり、問題には原因があるとしている。一方課題は担当者が「自らが設定するもの」である。そして担当者によって「あるべき姿」は変わるものである。自ら設定した課題は解決するのではなく達成するものである。

そのような視点から重回帰分析を基にした最適化を考察すると、距離 90 を実現する解は 2 つあることが判明した。スパーサーの値と 1 円玉数の組合せで表すと、(16.3, 4) 及び (20.3, 3) の 2 つである。このどちらを選択しても結果は同じである。しかし前者はコインを 4 個、後者はコインを 3 個使用しているため製造あるいは保守運用の費用に違いがある可能性がある。このような状況はビジネス現場ではしばしば発生する。それを考慮して解を選択することになる。そして得られた解は最適解と呼ばれる。

最適解を求める作業を最適化とすれば、そこには制約条件が存在することが多い。コイン射撃では 1 円玉の数について整数制約が存在した。このような制約条件を学ぶことができる点においてコイン射撃は優れた教材である。

6.4 コイン射撃を用いた能動型教育について

既に述べたように、コイン射撃はビジネスデータサイエンスを研究するうえで優れた素材であり教材でもある。それは測定も含めたデータの生成、データ処理の対象者が初心者であっても理解し易い情報の提供、費用や運用のコストが小さいなどの点で優れている。

コイン射撃は製造業を中心とした統計的品質管理の教育現場で長く使われてきた。本研究でも広くビジネスデータサイエンスの研究材料として有益であることを示した。

6.5 今後の課題

コインの滑走距離と目的変数、カタパルトの引き量をコインの重さを説明変数とした重回帰分析において、目的変数と説明変数との間に非線形性がある場合、その対応を検討することが今後の課題である。

7. おわりに

本研究ではデータサイエンス教育において、PDCA サイクルに基づいた能動型教育を示した。その中で、問題解決および課題達成を行うための PDCA サイクルの回し方と統計的品質管理の方法論の使い方を明らかにした。そして、これを実践し体験的に学ぶための教材としてコイン射撃を取り上げて議論した。

コイン射撃により得られたデータを統計解析ソフトを活用して解析し、その解析結果に対して問題解決及び課題達成の視点で考察した。このようなアプローチを行うことにより、数理統計の知識の少ない初心者でも様々なビジネス現場におけるデータサイエンスの取組みを体験し理解できることを明らかにした。

さらにコイン射撃はより高度な内容を提供する教材であること、すなわち課題として作業改善、組織改善まで含めたビリヤード射撃が可能であることも確認した。以上より統計的品質管理を基礎としたビジネスデータサイエンスのアプローチの有用性を示した。

参考文献

- [1] Box G. E. P. (1992): "Teaching Engineers Experimental Design with a Paper Helicopter", *Quality Engineering*, Vol.4 No.3, pp.453-459.
- [2] Box, G. E. P., Hunter, J. S., and Hunter, W. G. (2005): *Statistics for Experimenters*, Wiley.
- [3] Kume, H. , et.al (1985): *Statistical Methods for Quality Improvement*, The Association for Overseas Technical Scholarship.
- [4] 宮川雅巳 (2000): 「品質を獲得する技術」, 科技連出版社
- [5] Montgomery, D. C. (2005): *Design and Analysis of experiments, 6th ed.*, Wiley.
- [6] Myers, R. H., Montgomery, D. C., and Anderson-Cook, C. M. (2009): *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 3rd. Edition*, Wiley.
- [7] 永田靖 (2003): 「サンプルサイズの決め方」, 朝倉書店.
- [8] 仁科健 (2009): 「統計的工程管理」, 朝倉書店.
- [9] 日本品質管理学会中部支部産学連携研究会編 (2010): 「設計・開発における”Q”の確保」,

日本規格協会

- [10] 日本品質管理学会中部支部産学連携研究会編 (2015): 「開発・設計に必要な統計的品質管理」, 日本規格協会.
- [11] Ogawa, A., and Takahashi, T. (2014): “Activity to improve and promote TQM systems”, Proceedings of International Conference on Quality '14-Tokyo, Japan, V3-21, 564.
- [12] 小川昭, 高橋武則 (2021): “飛球シミュレーターによる包括的実験計画の実践的教育”, SAS Discovery Summit Japan, pp.4-22.
- [13] 小川昭, 高橋武則 (2023): “データサイエンス教育における能動型学習のためのコイン射撃教材の活用”, 日本品質管理学会第 131 回研究発表会要旨集, pp.73-76.
- [14] 小川昭, 高橋武則 (2023): “データサイエンス教育におけるコイン射撃を用いた検定の能動型学”, JSQC 第 132 回研究発表会発表要旨集, pp.53-56.
- [15] 小川昭, 高橋武則 (2023): “データサイエンス教育におけるコイン射撃を用いた回帰分析の能動型学習”, JSQC 第 133 回研究発表会発表要旨集, pp.22-25
- [16] 奥野忠一, 久米均, 芳賀吉郎, 吉澤正 (1981): 「多変量解析 改訂版」, 日科技連出版社
- [17] 奥野忠一, 片山善三郎, 上郡長昭, 伊藤哲二, 入倉則夫, 藤原信夫 (1986): 「工業における多変量データの解析」, 日科技連.
- [18] 高橋武則 (1991): “問題を構成する要素と構造”, 品質, Vol.21, pp.129-139.
- [19] 高橋武則 (1992): 「統計的方法と管理・改善」, 品質月間委員会.
- [20] 高橋武則 (1993): 「統計モデルと QC 的問題解決法」, 日本規格協会.
- [21] 高橋武則 (1998): 「統計的推測の基礎」, 文化出版局.
- [22] 高橋武則 (1998): 「模擬生産・模擬実験と統計的品質管理」, 品質月間委員会
- [23] 高橋武則 (2014): “模擬体験による認識・創造・経営の教育” — 質を中核としたデータ・マネジメントの体験教育 —, 日本品質管理学会誌品質, , Vol.44, No.1, pp.49-57.
- [24] 高橋武則 (2017): “統計モデルの模擬体験教育”, SAS Discovery Summit Japan 2017, A-1, pp.1-12.
- [25] Wu, C. F. J., and Hamada, M. S. (2009): *Experiments: Planning Analysis and Optimization (2nd ed.)*, Wiley.

[26] 吉澤正, 芳賀敏郎 (1992): 「多変量解析事例集: 第1集」, 日科技連.

[27] 吉野睦, 仁科健 (2009): 「シミュレーションとSQC」, 日本規格協会.

.

設計パラダイムとしての「超設計」の理論と技法

Theory and Methodology of "Hyper-Design" as a Design Paradigm

高橋 武則¹

Takenori TAKAHASHI

【要旨】

パラダイムとは考え方の拠って立つ基盤のことを意味する。これを言い換えれば対象となるものの本質をどうとらえるかというものの見方のことである。そして、ものの見方が変わればアプローチも大きく変化する。様々な分野では各々の歴史の中で何回ものパラダイムシフトが登場してきた。その代表例は天動説から地動説へのパラダイムシフトである。パラダイムはその宿命として絶対的なものではなく時間の流れの中で次のものに移行することは避けられない。

本研究は設計分野における現時点でのパラダイムシフトについて論じる。従来の数理的な設計論では多変数の重回帰式に基づく最適化であった。本研究は超因子に基づく重層構造の超構造関数を用いた最適化である超設計というパラダイムを紹介する。このもとでの設計はこれまでの設計とは大きく異なる。

超因子とは設計因子の中から自由に指定・変更ができるものである。そして超因子に基づく重層構造の超構造関数は超因子に関して微分・積分が可能のために数理的に高度な設計を可能にしている。また、超構造関数に関するパラメータ数が多い場合には定式化が混乱する。この場合には代入関数という方法で多パラメータ問題を解決している。

【キーワード】 超設計, 超因子, 超構造関数, 数理計画法

Abstract

A paradigm is the foundation on which a certain way of thinking is based. In other words, it is a way of looking at how one perceives the essence of a subject. And as one's perspective changes, one's approach changes drastically. This paper introduces the paradigm of hyper design, which is optimization using a hyper structure function of a multilayered structure based on hyper factors. Design under this paradigm differs significantly from conventional design. In various fields, paradigm shifts have appeared many times in the history of each field. A typical example is the paradigm shift in astronomy from the heliocentric to the geocentric theory. Paradigms, as their fate, are not absolute and inevitably shift from one to the next in the course of time.

¹ 高橋 武則 (Takenori TAKAHASHI) 統計数理研究所

This paper discusses the current paradigm shift in the design field. The conventional mathematical design theory is optimization based on multivariate multiple regression equations. This study introduces the paradigm of superdesign, which is optimization based on superfactor-based superstructural functions. The design under this paradigm is very different from the conventional design.

Hyper factors are design factors that can be freely specified and modified. Hyper structural functions with a multilayered structure based on hyper factors can be differentiated and integrated with respect to the hyper factors, enabling mathematically sophisticated designs. The formulation becomes confusing when the number of parameters related to the superstructure function is large. In this case, the multi-parameter problem is solved by means of a substitution function.

Keywords: hyper design, hyper factor, hyper structure function, mathematical programming

1. はじめに

工学とはパラダイム(paradigm:考え方)とメソドロジー(methodology:技法)の融合であり、工学には以下の5ステージが存在している。

企画:何を造るべきかを企てること。

開発:造ることを可能にするためのベースを準備すること。

設計:造るべきものの因子と水準を決定すること。

製造:設計に基づいて製品を造ること。

使用:製品を実際に使用すること。

上記の5ステージには各々固有のパラダイムとメソドロジーが存在するが、本研究はこの中の設計に焦点を合わせる。そして、本研究の目的は以下の2つを議論することである。

*設計のパラダイムとしての「超設計という考え方」

*それを行うためのメソドロジーとしての「超設計の技法」

これを言い換えると、実際に設計を行うためには以下の二つが必要である。

*設計というものをどう考えたらよいのか

*設計は実際にどうしたらよいのか

前者は設計のパラダイム(考え方)で、後者は設計のメソドロジー(技法)である。両者の関係は車の両輪に当たり、パラダイムに立脚しなければ何をしたらよいのかが分からないし、メソドロジーがなければどのようなパラダイムも「画餅」でしかないのである。

パラダイムというものの本質は相対的な存在であるために絶対的なものはあり得ない。このことはとりわけ工学においては顕著で、パラダイムは新しいニーズ(要請)と新しいハード(道具)の登場で次のパラダイムにシフト(移行)される宿命にある。つまりパラダイム

シフトのトリガー(引き金)はニーズ(要請)とハード(道具)なのである。

なおハードというものは単なる道具(手段)でしかないわけであるが、これはしばしば重要な役割を果たすものである。新しいハードが登場したことで新しいニーズが生まれる引き金にもなるし、新しいハードの出現が従来できなかったことができるようになることにより新しいパラダイムの登場の幕引きをすることもある。パラダイムシフトの典型例は天動説から地動説へのパラダイムシフトである。この場合には望遠鏡というハードが重要な役割を果たしている。望遠鏡による観察で把握した事実がそれまでの天動説では説明がつかず、これを説明するために地動説が登場したわけである。

設計におけるパラダイムシフトにとってのハードはコンピュータである。この場合のコンピュータの場合にはソフト(統計解析法, 数理計画法)が抱き合わせとなる。コンピュータの高度化により高度なソフトの機能が瞬時にして利用できるために設計の考えが大きく変化したわけである。一方様々な製品やサービスにコンピュータが組み込まれるとそのことを前提とした製品開発やサービス開発が必要となり、そのための新しい設計パラダイムが必要になるわけである。この新しい設計パラダイムの一つの候補として本研究は「超設計」を提案するものである。

2. 超構造関数におけるマクロ関数とマイクロ関数の数理構造

入出力機構の設計は超設計の原点でこれは本質的にはチューニング設計(目標関数の形状に合わせる設計)である。この設計において入力因子の水準数が多いと、設計対象の入出力曲線の形状は目標形状も実験で現れる形状とともに複雑な非線形で多くの場合には極値を有している。そして、水準数が10水準前後になると極値が複数(極大値と極小値が混在)^[1]となる場合^[1]が報告されている。このような場合の設計において極値は極めて重要な意味を持つために極値自体が設計の中核的な対象となる。本研究は極値を扱う設計法として超設計^[2]を用いた方法を用いて高度な実務事例を合理的に扱うことのできる設計法を紹介する。

2.1 重層構造の超構造関数

超設計の研究の目的は設計の概念と技法を体系化することで設計論を俯瞰的に整理したうえで設計の可能性を高度にかつ多様に進化させることである。このため本研究は超因子(Hyper Factor)に基づく超構造関数(Hyper Structure Function)という二重構造の関数及びその進化形の多重超構造関数(Multiple Hyper Structure Function)を提案している。この関数は設計において本質的に必要な関数の全てのものを取り出すことが可能な構造を有している。これは関数に関するハイパーリンク構造であることからこの関数を超構造関数と呼んでいる。更にこの関数の優れた点は超因子に関して微分・積分ができるために数理的に高度な設計(極値の設計)も可能にしている。

なお、超構造関数を用いる設計法の正式名称は超構造設計(Hyper Structure Design)であるが、多くの場合において超設計(Hyper Design)という短縮形で表現する。

2.2 超構造関数と極大値に関する横軸の値と縦軸の値

超構造関数における極値の設計の本質を明快に説明するために非線形の最小次数である 2 次の超構造関数を取り上げる。2 次は式の記述が簡潔であり、高次の場合も全く同様に、極値の個数が増える(次数-1)だけである。

$$F(M; \mathbf{x}) = b_0(\mathbf{x}) + b_1(\mathbf{x})M + b_2(\mathbf{x})M^2$$

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_p)$$
(1)

極値をとる横軸の値は超構造関数を超因子で偏微分を行い、それを 0 とおいた方程式を解けば得られる。

$$\frac{\partial F(M; \mathbf{x})}{\partial M} = b_1(\mathbf{x}) + 2b_2(\mathbf{x})M = 0$$

$$M_* = g(\mathbf{x}) = \frac{-b_1(\mathbf{x})}{2b_2(\mathbf{x})}$$
(2)

この横軸の値(正確には設計因子の関数)を超構造関数に代入すれば極値(縦軸の値)が得られる。

$$F(M_*; \mathbf{x}) = F(g(\mathbf{x}); \mathbf{x})$$
(3)

式(2)と式(3)はいずれも設計因子の関数であるため、これらを用いて極値の設計を自由に行うことができる。

3 次以上の高次の関数(極値の数は次数-1 存在する)の場合も全く同様のアプローチで極値を扱うことができる。なお、上記の表現は合成関数となっているが、これを展開すれば設計因子の関数が得られる。しかし、コンピュータで設計をする場合には合成関数で処理することができるので敢えて展開する必要はない。

2.3 超構造関数におけるマクロ関数とマイクロ関数

超設計の本質は重層構造の関数である超構造関数である。これは以下のような重層構造の関数である。

- ・マクロ的には超因子の多項式を構成し
- ・マイクロ的にはその係数が他の設計因子の関数である

超因子は複数指定することができ、その場合にはマクロ的には超因子の多変数多項式を構成しその係数が他の設計因子の関数であるという重層構造の関数となる。

本研究では超構造関数という重層構造の関数の構造を以後の議論でシステマティックに扱うために以下に示すようにマクロ関数とマイクロ関数という呼び方を用いる。

[1]マクロ関数とは超因子 M が構成する関数である。

$$F(M) = b_0 + b_1M + b_2M^2$$
(4)

※非線形のマクロ関数では極値を扱うことになる。

これは直積実験においては外側計画に対応

[2]ミクロ関数とはマクロ関数の係数となっているところの設計因子の関数である。

$$b_0(\mathbf{x}), b_1(\mathbf{x}), b_2(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_p) \quad (5)$$

※積項や2次項が登場し実験サイズが大きくなる。

これは直積実験においては内側計画に対応

さて、超因子の関数であるマクロ関数には様々なものがある。この観点からすると従来の設計で扱っているものはマクロ関数として線形の場合がほとんどである。そしてマクロ関数が線形の設計には1次式の場合と比例式（切片が0：原点通過）の場合とがあるが、圧倒的に比例式の場合が多い。その理由は比例式が傾き（1次項の係数）というパラメータを一つ持つだけなので設計が極めて容易であるからである。ちなみにこの設計は設計の原点である母平均の設計（母平均というパラメータを一つ持つだけの設計）と本質的に同じであるからである。

マクロ関数が非線形の場合でも、その対象区間において極値が存在しない場合には精度を気にしなければ線形近似で何とか設計することができる。このためにこれまでマクロ関数の極値の問題は注目されてこなかった。しかし、近年は超因子の水準が増えそこで扱う必要のあるマクロ関数が非線形となり、しかも極値（極大値、極小値）を有する場合が増えてきている。さらには、極値が複数になる場合も珍しくないという時代が到来している。スイッチの挙動に関する事例^[1]はその先駆けである

既に実務事例では、水準数が10前後を越えると極値が登場し時には複数の極値が登場している。これは逆に言えば複雑な挙動を設計するためには水準数を増やさなければならないという事情で水準が増えていると言えよう。しかもその形状は高次の多項式一つだけによる近似が困難な場合が多い。スイッチの挙動の事例には極大値と極小値が存在し、その設計対象には以下のものがある。

- ①極大値の座標そのもの、②極小値の座標そのもの
- ③2つの極値の上下差、④2つの極値の左右差
- ⑤極値の上下差と左右差の比（傾き）

これを3次関数では十分な精度で近似できない場合にこれを3次関数で近似したとすれば、極値がズレるために極値の設計を失敗することになる。

本研究は水準数が多くて複数の極値を持つマクロ関数に対してこれを合理的に設計する方法を提案する。

2.4 定式化における多数のパラメータへの対応

複雑な形状のチューニング設計では多数のパラメータが存在する。各パラメータに対して条件を用意するとそれは式が増えて定式化をいたずれに混乱させることになる。この問

題に対処するには代入関数^[5]という方法が重要になる。この方法はパラメータの数に依存しない方法(parameter free)なので汎用的に使用することができる。ただし、極値に関しては以下の2つの関数が必要である。

①極値の横座標の関数, ②極値の縦座標の関数

以上の幾つかのアプローチ方法を体系的に整合させて合体させたものが本研究で提案する「入出力機構の設計における極値に対する超設計」である。

2.5 設計において登場する多数のマクロ関数形状

水準数が多い設計では複雑な形状の関数を扱うことになるがその関数には2種類のものがある。

* 目標の関数：多くは座標という形式で与えられるがそれは一組だけである。

* 実験ランの関数：実験ラン全体の形状がランごとにばらばらで不統一(不揃い)の場合が少なくない。

この場合に注意しなければならぬことは実験全体の形状の様子がどうなっているのかを把握することである。目標の関数の形状は「ありたい形状」で、それ一つしかないのもその様子は形状がかなり複雑であったとしても対処は困難ではない。しかし、問題は実験で得られたデータの形状の場合である。水準数が多い場合の形状は実験ランによってまちまちの場合が登場する。このような場合には実験ラン全体をカバーできるように区間の分割を行う^{[3][4]}ことが重要である。すなわち分割区間に関しては実験ラン全体で同一の関数で近似できることが必要である。そして特別に注意すべきなのは頂点の近似である。頂点は以下の2つの座標(設計因子の関数)で把握される。

* 頂点の横座標, * 頂点の縦座標

頂点に関する関数はマクロ関数に対する超因子の微分で得られる。実験ラン全体に関して頂点が十分に近似できる区間に分割して区間ごとに超構造関数を求めれば、それを超因子で偏微分することで頂点の横座標も縦座標も得ることができる。それぞれは設計因子の関数として得られるので、これらを用いて設計を行うことができる。

2.6 超設計の水準が多い場合の関数近似の問題

これまでに述べた様に、超設計は超因子による重層構造の超構造関数に基づく設計である。重層構造の超構造関数とはマクロ的には超因子の関数でその係数が設計因子の関数である。超因子には幾つかのタイプがあり、その代表例の一つが製品の使用時に出力を制御する入力因子である。この場合の関数を入出力関数と呼ぶ。

近年の入出力設計においては超因子の水準の数が多くなっている。スイッチの設計のケースを初めとして10水準前後の事例が多数登場している。複雑な入出力の挙動をする製品の設計のためには多数の水準は不可欠である。複雑な挙動の場合は、それを記述するには極値のある数式(関数)を必要とする。スイッチの設計の場合には2つの極値(極大値と極小値)

が存在している。今後は設計の守備範囲がかなり広がるので、そこに登場する関数(入出力関数)の多くは複数の極値を有することになる。

そもそも極値がなく線形であるならば入力因子の水準は3水準で十分である。従来の設計の多くは線形近似で間に合う入出力関数に対するものであった。最も簡単な入出力関数は比例式(原点を通る1次式:パラメータは唯一の傾きのみという簡単な構造)である。比例式の設計は、その本質的な構造は唯一のパラメータに関する設計なので極めて単純である。それは入力因子のない(したがって超因子のない)設計なので母平均という唯一のパラメータを対象とする通常的设计と本質的に同じである。本研究は通常設計(超設計のない設計)のことを「退化した超設計」と呼ぶ。これは超設計の特殊形である。

もし近似精度を問わなければ極値を持たない非線形関数(単調増加関数, 単調減少関数)は線形近似でも対応が可能である。したがって、設計のための実験で多数の水準をとるということは非線形であることは勿論のこと極値を持つことがその本質的な理由である。このため極値をしっかりと扱うことができる設計が必要である。

極値が一つならば2次関数近似で良いが、極値が二つならば3次関数の近似が必要になる。そして、さらに極値が増えればより高次の関数が必要になる。しかし、実験サイズが大きくなると全ての実験ランに対して同じ高次関数で近似をすることは困難となる。このために全区間を一つの高次関数で近似するのではなく、区間を分割し複数の低次関数で近似すること^{[3][5]}が重要になる。

ところで極値が一つの場合でも2次関数による近似が問題となる場合がある。それは極値(極大値, 極小値)に対して左右の形状が大きく非対称である場合である。実事例ではこのような場合が少なくない。これを強引に2次近似で設計すると設計を失敗するリスクが高いため注意が必要である。このような場合は、2次近似で極値が近似できる区間とそうでない区間を分割する必要がある。

以上のことを整理すると水準数の多い設計では以下の方法を採用することが重要である。

〈1〉全区間を一つの関数で近似することが困難な場合は区間を分割して近似する複合近似^{[3][4]}を活用する。

〈2〉高次関数の場合も複合近似の場合も扱うパラメータが多くなるので設計では代入関数^[5]を活用する。

2.7 極値(極大値と極小値)の近似に関して

具体的な例として取り上げるスイッチの事例^[1]を紹介する。図1より一見すると全体としては2つの極値を有するために3次関数で近似ができそうである。そして実際に3次関数で近似すると寄与率が極めて高い。ほとんどの寄与率は90%を越えており若干一部に80%台のものがあるという状態である。しかし、極大値と極小値に注目すると実際のプロットと近似曲線の、極大値と極小値はだいぶ乖離していることが分かる。したがって複合近似^{[4][5]}が必要である。これにより図2のように十分な近似が可能になる。この図2は超設計によ

頑健設計の結果をし増しており、目標も攪乱因子の2つの水準 N1 と N2 に関してともに設計結果がほぼ一致していることを示している。

2.8 超設計のための実験を行う上での注意

マクロ関数の形状が複雑になるとこれを望む形状に設計するためにはマイクロ関数も高度なものが必要になる。この場合は確実に設計を行うために以下の様になる。

- ①：因子の数が多くなる。
- ②：実験水準の幅が広がる。
- ③：①と②より積項や2次項が必要になる。

このために以下の2つの新しいものが必要になる。

[1]解析模型表:複雑な実験計画は線点図では対応ができない。

解析模型表は積項や2次項の有無とその程度を表現することができる表である。

[2]最適計画:直交計画では対応ができない。

これは直交性を譲歩することで必要な項をおさえてサイズの小さな実験を計画することのできる合理的な実験計画である。

上記の内容を詳しく解説する、極値を持つ関数の設計では設計因子の数を十分に増やし水準幅の広くとるため、設計因子の関数において積項や2次項が必要になる。このために実験サイズが大きくなるので直交実験（直交表

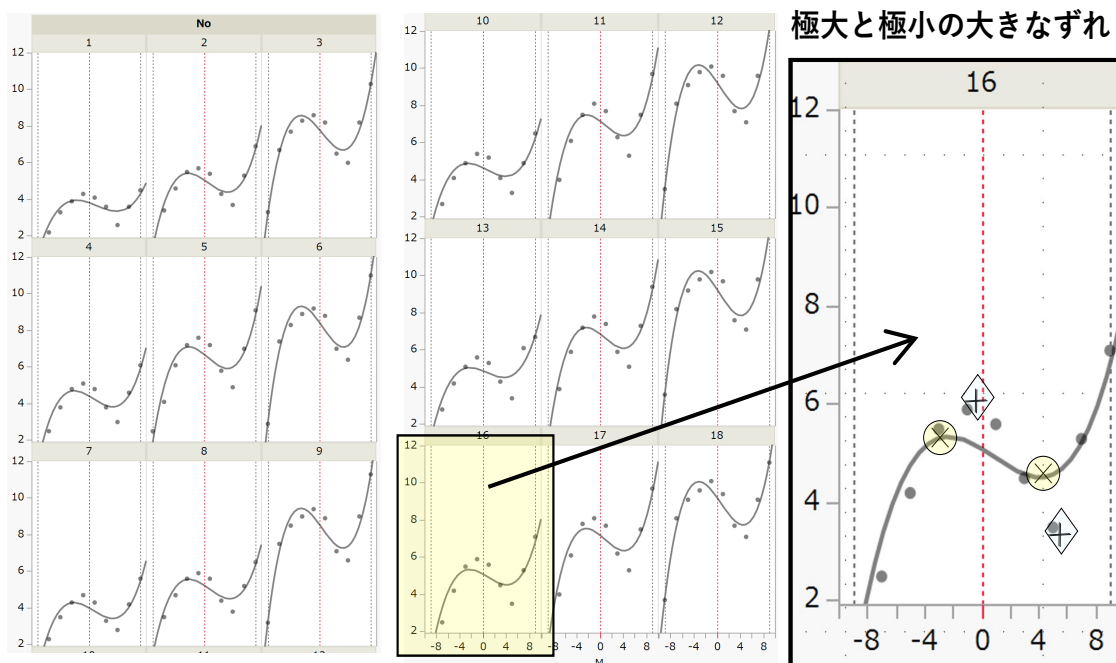


図1 3次近似では極値が大きくズレてしまう場合

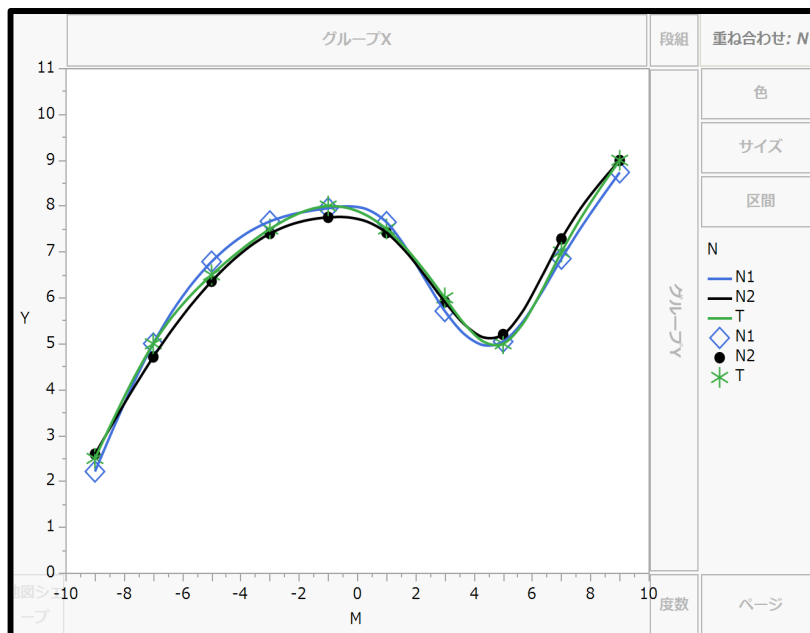


図2 2次近似の組合せで各極値を十分捉えられる場合

による実験)では対応ができない。直交実験では実験サイズが飛び飛び(素数2, 3のべき乗)のためにサイズの圧縮(縮小)が困難である。これに対しては「最適計画」を用いる必要がある。このような積項や2次項が混在する計画を可視化表現するためには線点図では対応ができない。そこで本研究は表1に示す解析模型表を提案する。

ところで、最適計画で実験サイズを圧縮(縮小)する際には直交性の劣化に配慮する必要がある。これはVIFを活用することで吟味・検討することができる。つまり一旦作成した計画に対して出力yに仮の値(どのような値でも構わない)を入れたうえで重回帰分析を行って全数選択をした上でVIFを確認する。VIFは各変数(各項)が他の変数(項)で説明されない割合(独自の情報を有している割合: 1.0-寄与率(他の変数に説明される割合))である。

これはある変数(項)を取り上げたときの他の全ての変数(項)を全数選択した重回帰式の寄与率を求めてその値を1.0から引けばよい。両者の関係は以下のような(上下の対応)になる。

| | | | | | |
|----------------|-----|------|------|------|-----|
| VIF | 1.0 | 1.25 | 1.40 | 1.50 | 2.0 |
| 1/VIF(独自情報の割合) | 1.0 | 0.80 | 0.71 | 0.67 | 0.5 |

完全に独立なら1.0となるがそれは理想で実験サイズを小さくするにはVIFを譲る(直交性を譲る)必要がある。社会科学分野ではVIFが2.0未満ならば許容する場合があるが、設計の場合にはこれは許容できない。できればVIFは1.25以下としたいが、事情によっては1.4ないしは1.5まで譲歩することも選択肢である。何故ならば実際には全数選択はあり得ないので1.5まで譲歩しても変数選択の結果はVIFの最大値は1.25前後になるからである。

ただし、VIFを大きく譲ると設計したものが実現しないリスクが高くなる。その場合には回帰修正を行う必要がある。なお、回帰修正については次の節で説明する。

表1 解析模型表の例(飛球シミュレーターの場合)

| 因子 | 変数 | 1次項 | 積項, 2次項 | | | | | | 項小計 |
|----|-------|-----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | | | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | |
| 本数 | x_1 | ◎ | × | ○ | △ | ○ | ○ | △ | 6 |
| 引量 | x_2 | ◎ | — | × | ○ | ○ | ○ | △ | 5 |
| 質量 | x_3 | ◎ | — | — | × | ○ | △ | ○ | 4 |
| 直径 | x_4 | ◎ | — | — | — | ○ | ○ | ○ | 4 |
| 角度 | x_5 | ◎ | — | — | — | — | ○ | ○ | 3 |
| 回転 | x_6 | ◎ | — | — | — | — | — | ○ | 2 |
| | 小計 | 6 | 0 | 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 24 |

◎：確実にある，○：あると思われる，△：あるかもしれない，×：ない，—：対象外

さて、表1の例では推定する項の合計が24で定数項の1を加えると合計25、更に誤差の分を1加えると26となる。しかし26ではVIFの問題があるので実験数を増やしてVIFの様子を見る。この例では、D最適計画を採用し、VIFが1.5以下となる30回が現実的である。

2.9 回帰修正

設計の成功のためには回帰修正が最後の切り札として重要な役割（ズレた値を本来の値に近付ける）を果たす。回帰修正が必要なのは実現確認で設計時の予想と確認結果に大きなズレが発生した場合である。この原因は以下の3つの理由で、実事例ではこのリスクは避けられない。

- 1) 誤差のばらつき: 不十分な誤差の低減によるもの
- 2) LOF (Lack of fit: 不適合): 重要な項の欠落によるもの
- 3) 項の間の相関: 直交性の劣化によるもの

2.9.1 誤差のばらつきによる問題

実実験では誤差のばらつきの影響が避けられない。このために設計の手続きに問題が無くても、設計のもとになる推定回帰式がばらついて真の解(母回帰式のもとでの解)からずれることが生じる。そのずれが許容できる場合は良いが、許容できない場合には解を修正する必要がある。この修正は次のような回帰式を用いて行う。

設計した解(設計因子の水準の組合せ)のうちの一つの設計因子(効果が大きくかつ扱い易いもの)を選びその水準を得たい状態が実現できそうな範囲でとり水準は非線形の場合にも備えて2次項も視野に入れて4水準とする。この回帰式の精度を上げるために各水準で繰返しをとる。

回帰修正実験で得たデータで2次式(2次項が有意でなければ1次式となる)を推定し、こ

の推定式で望む解に近付ける。この方法を回帰修正と呼ぶ。これは誤差のばらつきがある以上は当初からこれを行うことがあるかもしれないということを踏まえて設計を行う必要がある。

2.9.2 LOF (Lack of fit 不適合) による問題

ところで高次の関数を用いた設計ではパラメータの数が増える。区間分割して各々の区間で2次近似をしても、全区間でのパラメータの合計数は多くなる。これらに対して設計因子は多数必要でかつ設計を成功させるためには実験の水準幅を広くとる必要がある。その結果表1のように多数の積項と2次項が登場する。これらをすべて取り上げると実験サイズは大きくなり実施不可能になる。このためどこかで折り合いをつけてある程度の項(積項や2次項のうちの弱いもの)は無視する必要がある。このために解析模型表を活用するわけであるが、その予想が外れる場合もあるし、予想が当たっていても止むを得ず幾つかの項は無視するということが発生する。それらの影響で推定模型にLOFが生じる場合がある。この場合には誤差のばらつきが小さくても解の実現が上手くいかないことが生じる。この場合に回帰修正は有効である。

2.9.3 項の間の相関(直交性の劣化)による問題

実験サイズを縮小するために直交性を譲歩することで項の間の相関が高くなる。これによって変数選択で共線性の問題を生じて解の実現が上手くいかないことが生じる。この場合においても回帰修正の活用は有効である。

2.10 今後の実験の進むべき方向

これからの時代のチューニング設計においては超因子の水準が多くなりマクロ関数の形状は多数の極値を有する複雑なものになる。そもそも従来の設計では単純な場合である線形式(原点を通る1次式)が中心であった。何故なら複雑な形状の設計のニーズそのものは存在していたが、複雑な形状の設計が困難であったからである。

マクロ関数が非線形で複雑な形状のチューニング設計の場合に望む設計を実現するためには設計因子の数が増えかつ各設計因子の水準幅が広がるためにマイクロ関数には積項や2次項が不可欠になり複雑なものとなる。超設計はこのような設計を可能にする。そして、そのための実験計画は直交計画では対応ができず最適計画を用いる必要がある。また、複雑な模型を推定するために最適計画を用いる場合には積項と2次項に関してその状態(存在の程度)が表示できるツールが必要である。本研究はこのためのツールとして解析模型表を提案している。

最適計画と解析模型表を組合わせて用いると高度な模型の推定のための合理的な計画が作れるが、実験サイズが大きくなるのでそれを縮小したいというニーズが生じる。実験サイズの縮小のためには直交性の譲歩が必要である。両者のバランスを図るためにはVIFを活

用すると良い。実験サイズの縮小のためにある程度の直交性の譲歩の程度を検討するために VIF の吟味が必要である。

3. 柔軟設計

超設計はこれまでは主に入出力設計と頑健設計を扱ってきた。^{[2][3][4][5]}しかし超設計にはこのほかにも様々な設計に適用することができる。その代表的なものとして柔軟設計と連合設計と形態設計がある。本研究ではについて議論する

入出力設計と頑健設計にはその上の柔軟設計がある。これは入出力設計と頑健設計を高度化したものである。これによって多入力設計も量的攪乱因子の設計も可能になる。本章では柔軟設計を解説する。

超設計は超因子に関する多重構造の関数である超構造関数に基づく設計である。すなわち、超構造関数が構成できれば超設計は可能で、これは積項(交互作用)のある因子はどれも超因子にすることができることを意味している。したがって、超因子の指定をいろいろと行って設計の可能性を幅広く検討することができる。これを柔軟設計という。次に柔軟設計の数理について解説する。

3.1 超設計の数理

この場合の実験データから推定される重回帰式は翼長 X_1 と翼幅 X_2 に関して大きな水準値をとらなければ以下の様になる。これを「基盤関数」と呼ぶ。

$$y = \lambda(\mathbf{x}) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$$
(6)

3つの因子のうちの一つを特別な因子として指定しこれを「超因子」と呼ぶ。そして、もとの式を超因子に関する多項式に構成することができる。この式を「超構造関数」と呼ぶ。この例では因子が3つあるので超構造関数は以下の3ケースのものを構成することができる。いずれも超因子の1次式である。表記ルールとしては、セミコロン(;)の前の大文字の変数は超因子を意味し、その後の小文字の変数は設計因子を意味する。

$$[1] F(X_3; x_1, x_2) = (b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2) + b_3X_3$$

$$= B_0(x_1, x_2) + B_1X_3$$

$$[2] F(X_1; x_2, x_3) = (b_0 + b_2x_2 + b_3x_3) + (b_1 + b_{12}x_2)X_1$$

$$= C_0(x_2, x_3) + C_1(x_2)X_1$$

$$[3] F(X_2; x_1, x_3) = (b_0 + b_1x_1 + b_3x_3) + (b_2 + b_{12}x_1)X_2$$

$$= D_0(x_1, x_3) + C_1(x_2)X_2$$
(7)

上の式が示すように積項を持つ因子はいずれも超因子にすることが可能でありこれが柔軟設計である。基盤関数は超因子の指定がないために以下の様に表記(超因子は空集合)され、本研究ではこれを「通常設計」と呼ぶ。これは超因子が存在しないという超構造関数が退化

した特殊形なのでこの式の番号には[0]を用いる。厳密に言うと、この場合の超因子は前提条件になっている。つまり超因子が存在する場合にはその値で出力を制御するが、通常設計の場合には超因子はその水準が特定の値に固定さえているのである。

【注】超因子の概念がない場合には何が超因子でその固定されている水準値がいくらなのか自体がまったく認識されることはないのである。

$$[0] F(\emptyset; x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 \quad (8)$$

なお、柔軟設計の応用は広く多入力の設計を行うこともできる。その例として以下に2入力の場合を示す。設計因子が3因子なので、そこから2因子を取り出す組合せは6通りあるが、ここではそのうちの1つ(入力因子が X_2, X_3 で設計因子が X_1 の場合)を例として示す。

$$\begin{aligned} [4] F(X_2, X_3; x_1) &= (b_0 + b_1 x_1) + (b_2 + b_{12} x_1) X_2 + b_3 X_3 \\ &= E_0(x_1) + E_2(x_1) X_2 + E_3 X_3 \end{aligned} \quad (9)$$

この場合は設計因子が一つしかないので、その水準が決まると切片と X_2 の傾きは同時に決まってしまう。しかし、実際の設計では設計因子が多いので各々の係数関数を用いて各々を望む設計が可能である。この詳細は紙数の都合により割愛する。

3.2.4 種類の超設計

超設計は数理的には超因子の関数でその係数が設計因子の関数となっている重層構造の合成関数である。しかし、実務的には超因子にいかなる役割を与えるかで実際の設計は大きく異なる。超因子の役割には4種類のものがあり、それに伴って以下の4種類のタイプの超設計が存在する。

* 入出力設計, * 頑健設計, * 形態設計, * 連合設計

超設計はこれまで多くの場合に入出力設計と頑健設計および二つを合わせた入出力の頑健設計が用いられている。この入出力設計と頑健設計とは以下のものである。

[1] 入出力設計

これは因果関係(入力が原因で出力が結果という関係)の設計である。出力を入力で制御して望む出力を実現させるという設計である。入出力設計の対象は原則として自由出力(入力因子で出力を制御する方式)であるが、これの退化した場合として固定出力(入力因子がない方式)がある。

【注】入出力設計は出力に関して設計を行うという基本的設計である。

[2] 頑健設計

これは攪乱因子による出力の乱れ(固定出力の場合)の減衰あるいは因果関係の乱れ(自由出力の場合)の減衰を行う設計である。

【注】頑健設計は本来の設計に加えて乱れの減衰を加えた応用的設計である。

両者の設計の中核にあるものは「因果関係の設計」であることに注意されたい。

しかし、設計とは「設計因子を決めそしてその水準を決めること」なのでその対象は広く、その中には因果関係ではないものを扱う場合がある。それが連合設計と形態設計である。

3.3 柔軟設計という発想の転換

3.3.1 柔軟設計についての積項・交互作用

設計とは実行の前の計画である。計画であるがゆえに、様々な可能性を追究することが重要である。超因子に関しては設計因子のどれを超因子にするのかは自由であるので様々な可能性を吟味検討することは重要である。超因子は事前に決められた所与のものと考えがちになるが、積項（交互作用）があればどの因子も超因子にすることができる。なお、極端な場合であるが直ぐ後で説明するように、入出力設計の場合においては積項（交互作用）がなくても超因子（入力因子）にすることができるのである。

例えば、入出力設計とは、出力 y を然るべき入力因子で自由に制御して望む値を実現することである。多くの入出力設計では初めに入力因子ありきで、そのもとでどう設計するかというアプローチを行っている。しかし、出力 y に効く設計因子であればどの因子も入力因子にすることができる。ただし、積項（交互作用）の無い因子の場合には切片だけしか設計できないことに注意する。しかし、その場合でも傾きが急（傾きの絶対値が大）であれば非常に有望な設計因子の候補になり得る。もし他の因子との積項（交互作用）があれば傾きの設計することが可能である。このように、回帰分析の変数選択で選ばれた設計因子はすべて入力因子の候補になりえるのである。したがって、これらの可能性を吟味検討することは重要である。

あるいは、攪乱因子とはその制御は行わず（制御を放棄して）その影響を減衰するように設計を行うという超因子である。したがって、制御が難しい因子は攪乱因子にして頑健設計を行えばその制御の必要がなくなるのでメリットは大きい。設計因子に積項（交互作用）のある因子ならばどれでも攪乱因子にすることができ、そのことによるメリット・デメリットを検討することができるのである。

3.3.2 超設計における柔軟設計

超設計において鍵を握る重要な因子である超因子というものは設計因子の中から選ばれる。そして近似式としてモデル化された多変数関数（基盤関数）を超因子に関する多項式（超構造関数）に構成した上で設計（最適化）を行う。超因子には多種類の役割があり、どの因子を超因子にするのか、超因子の数をいくつにするのか、超因子にどのような役割を与えるのかは設計者の自由である。事前に超因子とその役割を決めて設計することが多いが、事後に超因子とその役割を決めて設計することも可能である。それどころか、事前に決められていた超因子の指定やその役割を事後に自由に変えることも可能である。それは以前にとったデータの再利用が可能であることを意味する。このような設計は柔軟設計^[9]と呼ばれこれは

超設計の更なる進化形である。柔軟設計が可能であるということは、超設計というものが数理模型に基づく極めて自由度の高い創造であることを明らかに示している。

3.3.3 柔軟設計と直積実験

直積実験は内側配置と外側配置の積の実験のために内側に存在する模型の全ての項と外側に存在する全ての項の積を扱うことが可能な構造を有している。実験データを用いて変数選択の重回帰分析を行うことによりモデル化がなされ基盤関数が獲得できる。このとき、内側配置と外側配置の一方の側あるいは両方の側に積項(交互作用)があれば、両者の積として3次ないしは4次という高次の積項(交互作用)が扱えるために様々な設計が可能になる。

高次の積項(交互作用)があると次の様に関数構造を自由に形成することができる。最初にある因子に注目してその因子を用いて多項式関数構造を形成する。このとき多項式の各項の係数部分が残りの因子の関数となっている。このような構造の関数が超構造関数である。最初に指定してそれに関する多項式関数構造を形成するという変数(因子)は超変数であるが、設計の場合にはこれを超因子と呼び、係数の関数を形成するその他の変数は設計因子である。超因子は複数を指定することも可能である。一般には、頑健設計(ロバストパラメータ設計)において外側配置の因子を超因子として用いることが多く、そして量的外側因子は入力因子で、質的外側因子は攪乱因子として用いられることが多い。しかし、逆転の発想で、内側の設計因子を超因子として扱うことも可能である。この場合、数学的には外側と内側は双対の関係(互いに裏返しの関係)になっている。さらに一層柔軟に考えれば、積項を持つ因子であればどれも超因子とすることができる。すなわち、直積実験のデータによって得られる高次の積項のある式を基盤関数と呼び、これの中の因子を自由に選んで超因子とする設計が柔軟設計である。要は積項(交互作用)があればよいので、データをとる実験は直積実験である必要はない。したがって、どのような方法であれ、積項(交互作用)のある式があれば柔軟設計は可能である。

- ・既定設計：最初から設計因子に定まった役割を与えて実験を行いそのもとで設計する。
- ※当初の目的に特化して余計なことはしないので折角の可能性を無視するので勿体ない。
- ・柔軟設計：設計時に設計因子に自由に役割を与えて設計する。データの再利用可能である。
- ※多様な試みにより様々な可能性を追究するとともに限界を把握することができる。

3.3.4 柔軟設計による可能性の幅広い検討

戦略的設計あるいは政策的設計では因子の役割を自由に変更することになる。ただしそれはしばしば設備変更、設備投資、製作条件の変更をとともうもとで行うことになる。例えば、外気温度が攪乱因子の場合に、恒温設備を導入すればそれを前提条件や設計因子にすることができるし、室内の温度制御の可能な設備を導入すればそれを入力因子にすることもできるのである。逆に、これまでたいへんな思いをして管理していたある作業を攪乱因子にして頑健設計を行えば、以後はその作業の管理は不要にすることができる。

柔軟設計では事後の（設計時）の因子役割の割り付けは自由なので、これを用いれば様々な可能性を試みて画期的な設計（戦略的設計、政策的設計）が可能になる。

1)柔軟設計によるデータの再利用

多くの場合、ある目的でとった実験データはその目的のもとでのみ使用されてその役割を終える。しかし、このデータを用いて柔軟設計を行えば、既存のデータで新たな設計を行って新たな可能性を探ることができる。あるいはこれから実験を行うという場合に、既存の実験データを用いて柔軟設計でいろいろな場合の設計を行って調べることで様々な因子の可能性や限界を把握したうえで、実験の計画を立てることができる。取り上げるべき因子と取り上げるべき水準、前提条件にすべき因子とその固定すべき水準、無視しても問題のない因子などの情報を獲得することができるので、有力な実験計画を立てることができる。

2)柔軟設計による戦術的最適化と政策的最適化

頑健設計の場合、そもそも絶対的な攪乱因子（誤差因子とも呼ばれる）というものは存在しない。たまたまの事情で、制御できないとか制御したくないために攪乱因子としているだけである。設備投資や技術改良・技術革新で攪乱因子は前提条件や設計因子や入力因子にすることができる場合も少なくない。この意味で、設計を戦略的あるいは政策的に解くことを考えるべきである。これまでの設計は与えられた条件のまま戦術的に求解することが多かったがそれは不自由な設計（最適化）である。

3.4 超設計の進化としての柔軟化

柔軟設計の最も基本的な数理についてはすでに解説した。ここでは柔軟設計の全体の状況について構造的に整理をしたものを解説する。

1)入力因子の交換

幾つかの設計因子を入力因子としてみて比較し、望ましいものを採用することが合理的な設計である。

2)多入力システムの採用

入力因子は複数を用いて多入力にする k とが可能である。以下は入力因子を複数にするメリットである。

*幅広い出力が実現可能となる。

*多数の同じ出力の組合せから選べる。※他項目の最適化ができる。

3)攪乱因子の変更および交換

最も高度な柔軟設計は攪乱因子の交換である。

攪乱因子は制御できない・制御が困難であるなどの理由からその影響（出力の攪乱）を減衰するという対象になったものである。しかし、もし改善や工夫あるいは高度な設備・装置の導入・開発でそれまでの攪乱因子が制御可能になれば、その（それまでの）攪乱因子を設計因子や入力因子に変更することが可能になる。これとは逆に、何これまでとか苦労して制御していた入力因子や設計因子を攪乱因子にしてその苦労から解放するという設計が可能で

ある。つまり、柔軟設計はこのような高度な設計も可能なのである。

3.5 女王蜂としての超因子

これまで述べてきた超因子と超構造関数の構造は本質的に「蜜蜂の女王蜂」の組織と似ている。この関係は超設計の本質を表しているので、しばらくは「蜜蜂のシステム」について解説する。

超構造関数の数理構造から明らかのように、超因子は多数の設計因子の中から特別に指定されたものである。この場合に注意すべきことは、どの設計因子を超因子に指定しても良いのである。ただし、後ほど触れるが、厳密に言えば積項を持たない設計因子だけは超因子の対象にはなり得ない。

「超因子」は例えて言えば蜜蜂の「女王蜂」である。女王蜂は特異な遺伝子を持ってロイヤルファミリーとして女王蜂になるべき運命で生まれてくるのではなく、他の多くの働き蜂と同様の遺伝子で雌蜂として誕生する。しかし、雌蜂の中の特別な蜂（王台と呼ばれる場所に産み付けられた雌蜂）のみに対してロイヤルゼリーが与えられることによって女王蜂になるわけである。そして他の雌蜂は働き蜂となり女王蜂とともに蜂の巣を築き運営していく。蜂の巣をシステム（プロセス、機械、製品）と考え、働き蜂を設計因子、女王蜂を超因子と考えれば、超設計の本質的な構造は蜂の巣というシステムの構造と同じであるということが言える。超因子に関する多項式が本質的な構造で、その係数が関数因子の関数（係数関数）となっているのが超構造関数である。ちなみに、超構造関数を作るための本質は積項（交互作用）にある。そして、後ほど説明するが、積項（交互作用）を手に入れるための有効な手段が直積実験である。

4. 形態設計

これは「形状」あるいは「状態」を設計するものである。この場合の超因子は時空間（「時間」および「空間」）である。この場合の設計対象の関数は因果関係ではなく単なる座標（横軸がいくらのとき縦軸がいくら）である。この座標が目標形状・目標状態に近くなるように設計因子の水準を決めることが形態設計なのである。形態設計はその中身数理的に複雑なので次章で詳述する。

4.1 形態設計のための極座標描写

図形を扱う設計では図3の(1)、(2)、(3)に示すような一筋縄ではいかない曲線の場合が登場する。工学での典型例として図3の(4)に示している磁力のヒステリシス曲線がある。これらの曲線の場合には「極座標変換による陽関数化」（以後は極座標描写と呼ぶ）を提案する。図4に示すように平面図形（曲線）の場合には角度 θ と距離 r による2パラメータ (θ, r) で描写し、立体図形（曲面）の場合には2つの角度 θ, λ と一つの距離 r の3パラメータ (θ, λ, r) で描写する。

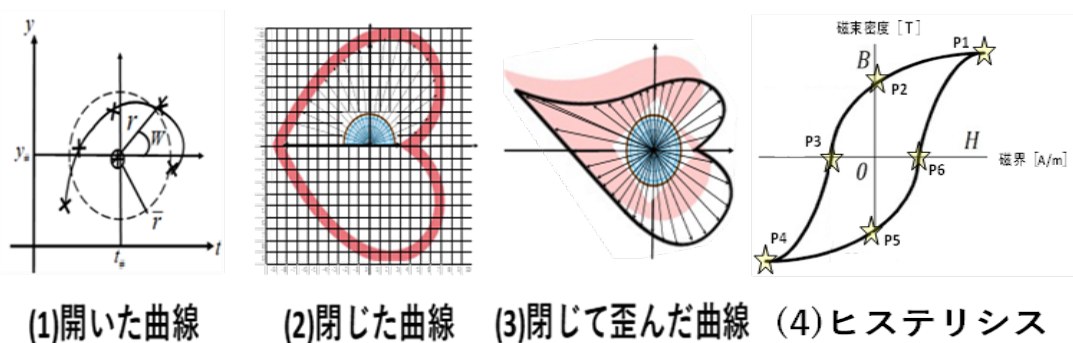
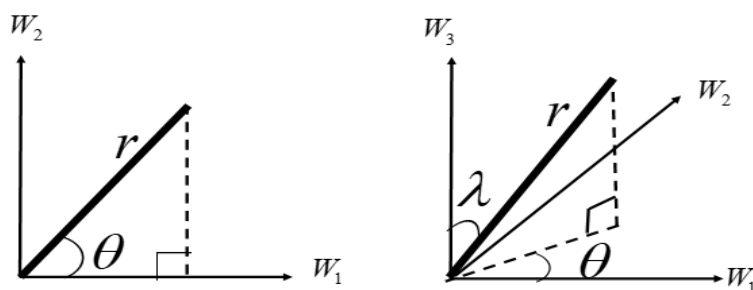


図3 容易にパラメータに落とし込めない図形



(1)2次元の極座標描写 (2)3次元の極座標描写
 $(W_1, W_2) \Rightarrow (\theta, r)$ $W_1, W_2, W_3 \Rightarrow (\theta, \lambda, r)$

図4 極座標描写

4.2 極座標の原点の決め方

極座標描写とは極座標 (n次元ユークリッド座標を1個の動径とn-1個の偏角で表現した座標) を用いて対象を表現することである。この場合に重要なのは極座標の原点の決定である。この決定法には代表的なアプローチとして以下の2つの方法が考えられる。

- 1) A法: 距離の平方和最小
- 2) B法: 距離の偏差平方和最小

以後は説明を簡単にするために2次元の場合を例として取り上げて解説する。

*A法: その点からの距離の平方和を最小にする点

※なるべく大きな距離が出ないようにする。

*B法: その点からの距離の偏差平方和を最小にする点

※なるべく距離を同じ長さに揃えたい。

次に2つのアプローチについて具体的に解説する。

1) A法 (距離の平方和最小)

この方法はその点からの距離の平方和が最小になるという点を求めることである。n個の点の距離の平方和は以下ようになる。

$$r_i = \sqrt{(W_{1i} - W_{1*})^2 + (W_{2i} - W_{2*})^2}$$

(10)

$$\begin{aligned} S(W_{1*}, W_{2*}) &= \sum_{i=1}^n r_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \{(W_{1i} - W_{1*})^2 + (W_{2i} - W_{2*})^2\} \rightarrow \text{最小} \end{aligned} \tag{11}$$

式(11)の最適化の解は次の式を解くことで得ることができる。

$$\begin{cases} \frac{\partial S(W_{1*}, W_{2*})}{\partial W_{1*}} = 0 \\ \frac{\partial S(W_{1*}, W_{2*})}{\partial W_{2*}} = 0 \end{cases} \tag{12}$$

この解はよく知られているように以下のようなになる。

$$W_{1*} = \sum_{i=1}^n W_{1i} / n = \bar{W}_1, \quad W_{2*} = \sum_{i=1}^n W_{2i} / n = \bar{W}_2 \tag{13}$$

これはそれぞれのデータの平均を求めればよいので分かり易いし計算も極めて容易である。

2) B法 (距離の偏差平方和最小)

この方法はその点からの距離に関して偏差(距離の平均からの距離)の平方和を最小になるという点を求めることである。

ここで求めたいものは以下の最適化 (偏差平方和の最小化) の解である。

$$\begin{aligned} f(W_{1\#}, W_{2\#}) &= \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 \rightarrow \text{最小} \\ r_i &= \sqrt{(W_{1i} - W_{1\#})^2 + (W_{2i} - W_{2\#})^2} \\ \bar{r} &= \sum_{i=1}^n r_i / n \end{aligned} \tag{14}$$

上記のものを書き直すと以下のようなになる。

$$\begin{aligned} f(W_{1\#}, W_{2\#}) &= \sum_{i=1}^n \left\{ \sqrt{(W_{1i} - W_{1\#})^2 + (W_{2i} - W_{2\#})^2} \right. \\ &\quad \left. - \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{(W_{1i} - W_{1\#})^2 + (W_{2i} - W_{2\#})^2} / n \right)^2 \right\} \rightarrow \text{最小} \end{aligned} \tag{15}$$

これは少し高度な計算になるが、コンピュータを用いれば数値計算により容易に求めることができる。

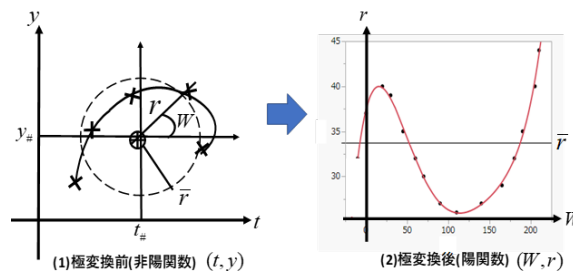


図5 極座標変換による陽関数化の例

図5に極座標変換による描写の例を示している。この場合の極座標の原点はA法で求めてもあるいはB法で求めても良い。図5では簡単なA法で原点を求めたもとの結果を示している。この例の場合には、得られた陽関数は精度が粗くてもよければ3次関数で近似し、精度を上げたいならば2区分(2つの2次関数)で近似すればよい。さらに近似精度を上げたいならば近似に用いる多項式の次数を上げる必要がある。

4.3 閉じた曲線の場合の極描写

図6の(1)に示すような閉じた曲線は全体をそのまま極描写により陽関数化することができる。しかし、図6の(2)に示すような場合には閉じた曲線は全体をそのまま極描写によって陽関数化することができないので、幾つかに区分をしなければならない。この場合、区分した各部分は開いた曲線になる。なお、図形を区分した場合には、区分した図形ごとに極座標の原点を求める必要がある。

[注] 閉じた曲線を区分する必要があるかないかは、原点から 360° 回したときに動径が複数の点に交わらないという条件を満たす原点がとれるかどうかである。そのような原点が取れば区分の必要はないが、取れなければ区分しなければならない。

4.4 A法とB法の比較

A法もB法も非陽関数を陽関数にできるという点では同じである。したがって陽関数にした後で超設計は可能である。両者を比較すると、変換方法が面倒ではあるがB法の方が優れている。しかしA法でも設計は可能である。

A法とB法の比較の一例を図7に示している。これらはあくまでも一例として参考にされたい。

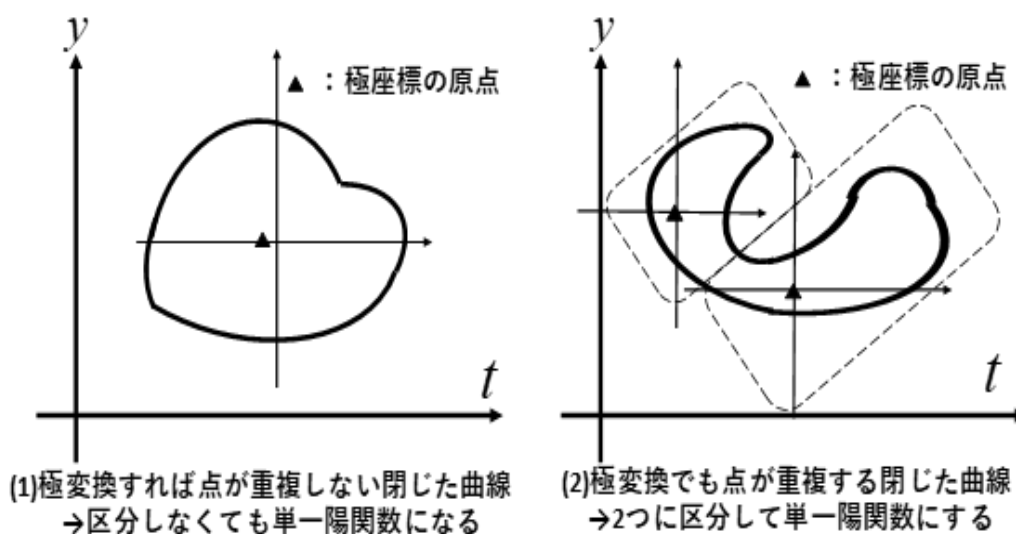


図6 極描写と区分による閉じた曲線の単一陽関数化

(1)閉じた曲線で円に近い場合

閉じた真円（あるいは真楕円）の場合には A 法と B 法の両者の解は必ず円や楕円の中心となる。そして真円（あるいは真楕円）に近い場合も両者はほぼ同じになる。しかし、真円や楕円でない場合には両者の解は異なるが、歪み方のパターンによって両者の良し悪しは case by case となるので明確な優劣はつけ難い。

(2) 開いた曲線で円に近い場合

B 法は円である限り必ず円の中心となるが、A 法は欠けた部分の影響を受けて円の中心からずれる。この場合には B 法の方が優れているが A 法が絶対に使えないわけではない。

【注】B 法は円ならば水平線(直線)という陽関数になりその後の設計処理が極めて簡単である。しかし、A 法は非直線となるためにその後の設計処理が多少面倒である。しかしながら A 法でも設計自体は可能である。

(3)閉じた曲線で凹みが小

B 法の原点は図形の外に出るために単一の陽関数化ができない。しかし、A 法の原点は図形の中に存在するために単一の陽関数化ができる。この場合は、B 法は区分するとよい。B 法のための数値計算ができない場合には A 法で陽関数化すればよい。

(4)閉じた曲線で凹みが大

いずれも原点は図形の外に出るために単一の陽関数化ができない。しかし、A 法は 2 区分にするとうまく行くが、B 法は 2 区分してもうまく行かない。

以上より、2つの方法には特徴があるために使い分ける。可能であれば両方法で原点を求めて都合の良い方を選択するとよい。なお、図 7 の(4)に示すように、区分が必要な場合も存在する。この場合には、区分後は A 法でなければならないことに注意する。

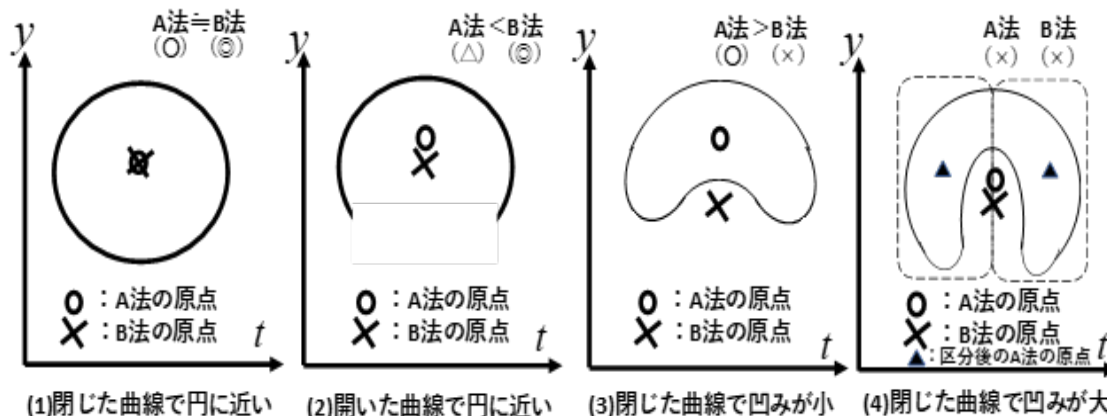


図7 A法とB法の比較

複雑な関数形状の設計のために閉じた図形に関する設計方法の本質はそのままでは陽関数で扱えない関数形状の陽関数化である。加工・鍛造・鋳造・射出成型・半導体製造などの設計においては形状の設計は極めて有用である。

5. 連合設計

設計は複数の立場の組織(複数の個人の場合も含む)による合意形成であると捉えることができる。複数の組織が因子と水準を共有する場合にこれを「連合」という。この場合にトレードオフの調整がポイントになり、その話し合いは「交渉」ということができる。交渉は感情的なやり取りではなくそれにはドクトリン(基本原則)が必要でこのもとに話し合いがなされる。そのアプローチはPDCAサイクルと本質的に同じである。そして、そのベースは科学的なエビデンスが必要でこれが用意された設計が連合設計である。

これは超因子にあたるものがステークホルダーで、それらの間で合意できる設計因子とその水準を決めることが設計である。この設計の本質は合意形成で、どういう利害関係にあるのかにもよるが、その実体は「歩み寄り」に基づく「交渉」である。それには定式化の工夫が不可欠で、このためにはドクトリンに基づく必要がある。合意形成のための交渉の代表的なドクトリンには4つある。それを数理的に説明するために以下の式を用いる。

5.1 連合設計とPDCAサイクル

連合設計の本質は「科学的な試行錯誤に基づく合意形成」である。それは以下のPDCAサイクルを数理計画法を用いて回すことである。

- * P(plan) : 設計意図を定式化
- * D(do) : 最適化により求解
- * C(check) : 解は受容れられるかの吟味
- * A(act) : 受容れられない場合に交渉

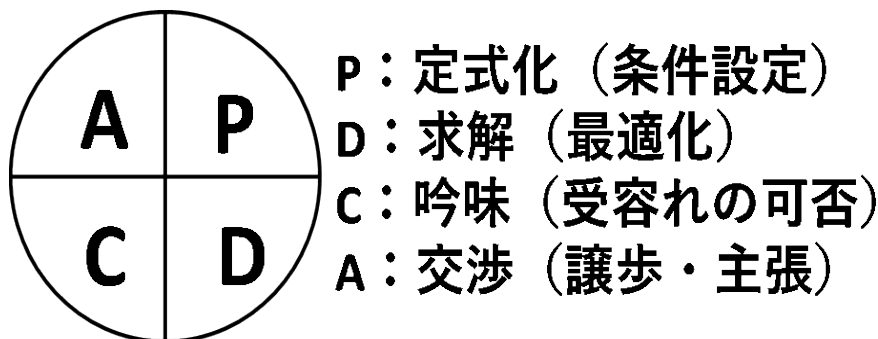


図8 設計(合意形成)のPDCAサイクル

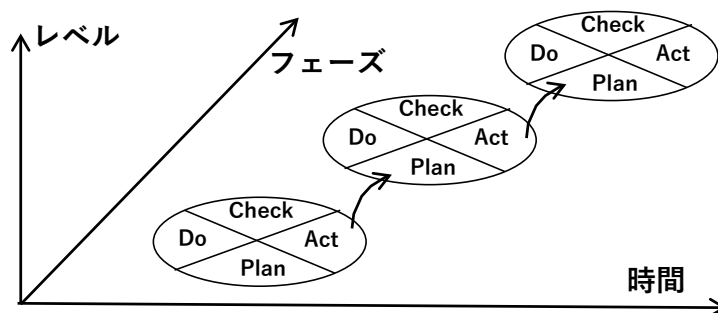


図9 PDCA サイクルのスパイラルアップによる合意形成

ただし解が受け容れられるかどうかの判断と合意形成の交渉に関しては数理そのものの範疇ではない。しかし、判断および交渉は客観的なエビデンスベースで行うことが重要である。感情的あるいは主観的な判断および交渉を避けるためには数理計画法に基づく PDCA サイクルのアプローチは有用である。

5.2 連合設計の数理とドクトリン

設計は複数の立場の組織(複数の個人の場合も含む)による合意形成であると捉えることができる。複数の組織が因子と水準を共有する場合にこれを「連合」という。この場合にトレードオフの調整がポイントになり、その話し合いは「交渉」ということができる。交渉は感情的なやり取りではなくそれにはドクトリン(Doctrine: 基本原則)が必要でこのもとに話し合いがなされる。そのアプローチは PDCA サイクルと本質的に同じである。そして、そのベースは科学的なエビデンスが必要でこれが用意された設計が連合設計である。

5.2.1 代入関数 (個別関数)

代入関数(個別関数)とは超構造関数の超因子に数値を代入したものである。そして超因子が質的因子の場合にはダミー変数に数値を代入した変数である。この場合は質的因子の水準の数だけの関数が設計の対象になる。その数を n 個とすると以下の様になる。

$$f_1(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x}=(x_1, \dots, x_p) \quad (16)$$

5.2.2 要約関数

合意形成のために行う交渉の代表的なドクトリンには 4 つのものがある。それを数理的に説明するために以下の式を用いる。ここでは一般形としての n 個の立場の場合で、代表的な関数(統計数理的には要約関数)として 4 つ(最大値, 最小値, 範囲, 平均値)の式を用いている。しかし、この他にも標準偏差, 中位値, 中央値など必要なものを用いることができる。

$$\begin{aligned}
F_{Max}(\mathbf{x}) &= \text{Max} \{f_1(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})\} \\
F_{Min}(\mathbf{x}) &= \text{Min} \{f_1(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})\} \\
F_{Ran}(\mathbf{x}) &= F_{Max}(\mathbf{x}) - F_{Min}(\mathbf{x}) \\
F_{Ave}(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{x}) / n \\
f_1(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} &= (x_1, \dots, x_p)
\end{aligned} \tag{17}$$

上記の要約関数の表現を用いて代表的なドクトリンの最適化を示すと次のようになる。

[Doctrine1] 公平優先：ばらつき・範囲の最小化

$$F_{Ran}(\mathbf{x}) \rightarrow \text{最小化} \tag{18}$$

[Doctrine 2] 総力向上：平均(合計)の最大化

$$F_{Ave}(\mathbf{x}) \rightarrow \text{最大化} \tag{19}$$

[Doctrine 3] 弱者救済：最も不利なものを救済するために最小値の最大化

$$F_{Min}(\mathbf{x}) \rightarrow \text{最大化} \tag{20}$$

[Doctrine 4] 強者優遇：他のもの(連合外のもの)に打ち勝つために最大値の最大化
 実際にはこれらを組合わせて用いる。例えば最小値をある値以上を保証したもと(片側制約)で平均(目的関数)を最大化(最適化)するというような定式化になる。

$$\begin{aligned}
\text{目的関数: } & F_{Ave}(\mathbf{x}) \rightarrow \text{最大化} \\
\text{制約条件: } & F_{Min}(\mathbf{x}) \geq \text{最低保証値} C_{\#}
\end{aligned} \tag{21}$$

5.3 関連値の重要性

数理的な観点からの最適化においては以下の4つが関心事である。

定式化

[1] 目的関数, [2] 制約条件

求解の結果 (直接対象値)

[3] 最適値, [4] 最適解

しかし、設計においては求解の結果の他への影響の把握が重要である。これは求解の結果を代入した値という間接対象値で、本研究はこれを「関連値」と呼ぶ。

求解の結果 (間接対象値)

[5] 関連値

関連値は定式化には関与しない。しかし求解の結果の影響を受けるのでその様子は把握しなければならない。多くの場合は把握した結果として問題はないということになる。しかし、時には把握したところが受容られない値となることもあるので十分な警戒が必要である。

もし受容れることができないとなった場合には次の PDCA ではこの項目を考慮項目に格上げして次の定式化においてこれを制約条件か目的関数に加える必要がある。

5.4 制約条件と目的関数

事前に単独の最適化を行うことで関連する様々なものの様子を知ることができる。その上で定式化をして求解するわけであるが、何を制約条件にすればよいのか、そして何を目的関数にすればよいのかが問題となる。多数の項目（関数および合成関数）が用意されるがこれらの全てを定式化に用いるわけではない。求解は基本的に何回かの PDCA サイクルを回して（試行錯誤を経て）決定されるものである。その際に、以下のように分類したうえで必要なものを用いるのが合理的である。

<A>必須項目：何としても満たすべきなので条件は譲れないもの。

- ・再定式化でも変更はしない。

考慮項目：できるだけ満たして欲しいが必要な場合には条件を譲るもの。

- ・再定式化では条件の譲歩(変更)を検討する。

<C>把握項目：条件は付けないが解が得られた時にどうなるのかを把握するもの。

- ・再定式化では原則として変更しない。しかし、例外的に変更することもある。それはあまりにもひどい値になったために容認できないという場合である。その際には、再定式化では考慮項目に格上げする。

必須項目はどうしてもクリアすべきものなので制約条件とすべきである。単独の最適化により限界を把握した上で設計目的と睨み合わせてクリアすべき値を決め、これを制約条件にする。制約条件には等式制約と不等式制約（両側制約と2種類の片側制約がある）があるので適切なものを採用する。

考慮項目は様子を見て譲歩が可能な項目なのでその中で最も優先順位の低いものを目的関数にする。

多くの人は目的関数が最も重要視されていると誤解している。じつは目的関数は他のもので制約条件で必要な状態を確保した条件のもとでの最適化なので、余りものの中の最適とすることができる。形の上では（見かけ上は）最適にするというわけであるが、実態は最も優先順位が低く、お余りの中でのベストをいただくしかないのである。

優先順位の高い考慮項目は必須項目に準じて制約条件として必要な値を確保する。ただし、解に関して合意が形成されない場合には次の PDCA で定式化を変更する。その際に考慮項目で優先順位の低いものから条件の譲歩を行っていく。このことで PDCA サイクルが回るのである。

ただし、その過程で把握項目の中で問題が生じた場合にはそれを考慮項目に格上げしなければならない。

このような柔軟な（話し合いで調整を行う）、しかし科学的な（数理警句法に基づく）試行錯誤が連合設計の本質である。

5.5 最適化（設計）のための定式化の事前準備

この設計をうまく行うためには設計に関係する各種の項目の限界値(単独の最適化とその際の他の項目の様子)を事前に把握することが肝要である。

連合設計で注意すべきことは「安易に公平優先を掲げた解は全員を不幸にする」ということである。これを避けるためにはステークホルダー全員の協調的な譲歩が必要で、そのベースは相互の全体理解(ある項目の限界が他の項目に与える影響の把握)とドクトリンに基づくところである。

ドクトリンなしに求解の結果を見て右往左往して感情的な話し合いをすることは避けなければならない。初めにドクトリンを明確にし、そのもとで求解のPDCAサイクルを回すことが必要である。

5.6 連合設計の例

仮想実験では実験データからモデルを作り設計を行う。その際に複数の評価者のモデル(評価)は異なる。この状況下での設計は連合設計となる。図10は前提条件、因子と水準そしてモデルの予想を示している。このもとで立てた最適計画が図11の左側で、この図の右側が5人の評価結果(100点満点)である。図12は各自の評価の関数(推定回帰式)である。変数選択は中心化変換のもとで行った上で結果を見易くするために展開した式で示している。

なお、図10では予想効果を簡潔に表現する3種類(○:ある, △:弱い, ×:ない)にしている。しかし、可能ならば以下の様に6種類にすることが望ましい。

◎:強い, ○:ある, △:弱い, ×:ない, ?:不明, -:非該当(質的因子の2次項など)

上記の場合には最適計画で計画を立てる場合に以下の様な柔軟なアプローチが可能になる。

実験サイズに強い制限がある場合には◎と○

実験サイズに弱い制限がある場合には◎と○と△

実験サイズに余裕がある場合には◎と○と△と?

最適計画を用いれば実験サイズの圧縮ができる。ただし、2.8で示してのようにVIFについては十分に注意することが重要である。

| (1)前提条件と因子と水準 | | | | | | (2)解析模型表(各項の効果の事前予想) | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|------|-------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 基本給:24万円 | | | | | | | | | | | | |
| 年間休日:125日 | | | | | | 1日の労働時間:8時間(9:00-18:00, 休憩1時間) | | | | | | |
| ※8~9割出勤、1~2割テレワークとなる予定(要検討) | | | | | | | | | | | | |
| No. | 因子 | 水準 | | | | 因子 | 1次効果 | X1教育 | X2評価 | X3人数 | X4残業 | X5通勤 |
| 1 | 新人教育期間(週間) | X1教育 | 4週間(1ヵ月間) | 12週間(3ヵ月) | - | X1教育 | ○ | × | △ | × | × | × |
| 2 | 評価機会(回/年) | X2評価 | 1回/年 | 2回/年(半年に1回) | - | X2評価 | ○ | | × | △ | ○ | × |
| 3 | 配属チーム人数(人) | X3人数 | 3人 | 9人 | 15人 | X3人数 | ○ | | ○ | × | | × |
| 4 | 残業(時間/月) | X4残業 | 0時間/月(+0円) | 20時間/月(+3万円) | 40時間/月(+6万円) | X4残業 | ○ | | | | ○ | ○ |
| 5 | 繰上げ住宅からの通勤時間(分) | X5通勤 | 30分(20㎡の1R)ユニットバス | 60分(25㎡の1K)風呂トイレ別 | - | X5通勤 | ○ | | | | | × |

【注】 予想効果→○:ある, △:弱い, ×:ない

図10 仮想実験の前提条件と因子と水準及び解析模型表

| No | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | [1] | [2] | [3] | [4] | [5] |
|----|----|----|----|----|----|------|------|------|----------|------|
| 1 | 4 | 1 | 3 | 40 | 60 | 67.1 | 55.4 | 58.3 | 36.66... | 25 |
| 2 | 4 | 1 | 9 | 40 | 60 | 71.8 | 41.9 | 73.3 | 53.33... | 15 |
| 3 | 4 | 1 | 15 | 0 | 60 | 81.1 | 40 | 85 | 22.77... | 17.5 |
| 4 | 4 | 2 | 3 | 20 | 30 | 30 | 90 | 45 | 28.33... | 65 |
| 5 | 4 | 2 | 9 | 40 | 30 | 30 | 82.3 | 71.7 | 47.77... | 70 |
| 6 | 4 | 2 | 15 | 0 | 30 | 39.3 | 72.7 | 65 | 20 | 40 |
| 7 | 12 | 1 | 3 | 0 | 30 | 53.2 | 90 | 53.3 | 45 | 62.5 |
| 8 | 12 | 1 | 9 | 20 | 60 | 95 | 47.7 | 83.3 | 70 | 12.5 |
| 9 | 12 | 1 | 15 | 40 | 30 | 43.9 | 65 | 48.3 | 64.44... | 52.5 |
| 10 | 12 | 2 | 3 | 0 | 60 | 95 | 59.2 | 80 | 42.22... | 27.5 |
| 11 | 12 | 2 | 9 | 0 | 30 | 57.9 | 86.2 | 66.7 | 47.77... | 40 |
| 12 | 12 | 2 | 15 | 40 | 60 | 85.7 | 55.4 | 76.7 | 67.22... | 10 |

図 11 実験(最適計画)の因子と水準と 5 人の評価(データは階差按分法による)

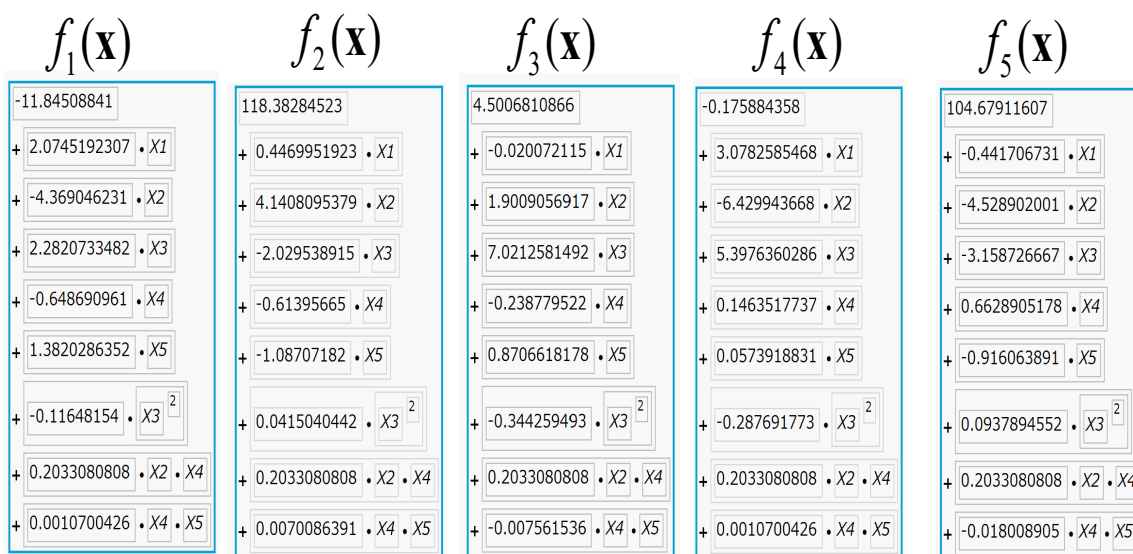


図 12 5 人の評価の関数(中心化変換のもとで行った変数選択の結果を展開した表現)

なお、重回帰分析は精度を上げるために 5 人に関してダミー変数で扱って全体として処理をしている。そして重回帰モデルが推定されたら、それより 5 人の個別の重回帰式を作成している。

【注】 5 人それぞれごとに重回帰分析を行うことも選択肢である。5 人の状況が大きく異なる場合にはこの方法が無難である。

この後の設計は既に述べた様にドクトリンを決めて連合設計を行うことになる。紙数の都合によりその 1 例を次節で紹介する。

5.7 連合設計の例

1) 公平優先のみで解く.

制約条件は何も付けずに公平優先で解くと範囲の最小化ができるが, この場合の解は最小値が 41.3 と 50 を割っている.

目的関数: $F_{Ran}(\mathbf{x}) \rightarrow$ 最小化

制約条件: なし

最適解: $x_{1*} = 5.2, x_{2*} = 1.0, x_{3*} = 15.0, x_{4*} = 40.0, x_{5*} = 39.7$

最適値: $F_{Ran}(\mathbf{x}_*) = 14.0$

関連値: $F_{Min}(\mathbf{x}_*) = 41.3, F_{Max}(\mathbf{x}_*) = 55.3, F_{Ave}(\mathbf{x}_*) = 47.3$

2) 最小値の限界 (最小の人の値はどこまで大きくできるか) の把握

最小値の最大化でどこまでの値になるのかを把握してみる. この場合の最小値の最大値は 57.9 になる. 平均値は 65.0 とかなり良くなる. しかしながら, 範囲は 27.0 と大きく開いている. 範囲が大きいのは不公平感が出るので抑えたい.

目的関数: $F_{Min}(\mathbf{x}) \rightarrow$ 最大化

最適解: $x_{1*} = 12.0, x_{2*} = 2.0, x_{3*} = 3.7, x_{4*} = 40.0, x_{5*} = 39.7$

最適値: $F_{Min}(\mathbf{x}_*) = 57.9$

関連値: $F_{Ran}(\mathbf{x}_*) = 27.0, F_{Max}(\mathbf{x}_*) = 84.8, F_{Ave}(\mathbf{x}_*) = 65.0$

3) 最小値に制約を付けて範囲の最小化を行う.

最小値 ≥ 50.0 の制約条件のもとで範囲を最小化する. この場合は範囲は 16.7 におさえられるので悪くはない. 公平優先の解に比べると範囲が 14.0 から 16.7 と少し広がるが, 他の項目は全て良くなる.

最小値は 41.3 から 50.3 へ, 最大値は 55.3 から 67.0 へ, 平均値は 47.3 から 58.4 へしたがって最小値の人が範囲の多少の広がりを許容できるならこの解が望ましい.

目的関数: $F_{Ran}(\mathbf{x}) \rightarrow$ 最小化

制約条件: $F_{Min}(\mathbf{x}_*) \geq 50.0$

最適解: $x_{1*} = 9.6, x_{2*} = 1.0, x_{3*} = 7.8, x_{4*} = 40.0, x_{5*} = 37.8$

最適値: $F_{Ran}(\mathbf{x}_*) = 16.7$

関連値: $F_{Min}(\mathbf{x}_*) = 50.3, F_{Max}(\mathbf{x}_*) = 67.0, F_{Ave}(\mathbf{x}_*) = 58.4$

以上のように求解の PDCA サイクルを回して合意を形成することが重要である.

5.8 連合設計と頑健設計

設計はより上位の視点からとらえると条件(因子と水準)に関する関係者の合意形成と見ることができる。これは因果関係に基づく交渉であるためにモデル(数式)とともにドクトリン(基本原則)が不可欠である。代表的なドクトリンには前述のように

公平優先, 総力向上, 弱者救済, 強者優遇

の4つのものがあり, さらにはこれらをブレンドしたドクトリンも必要になる。この観点から眺めると, 頑健設計は連合設計のうちの公平優先にあたるものである。したがって従来の質的攪乱因子の設計は連合設計の特殊形と位置付けることができる。そして頑健設計を連合設計として扱えば, 公平優先以外のいろいろなドクトリンも用いることができるのでより高度な頑健設計が可能になる。

従来の頑健設計は公平優先に特化している。しかしこれには注意をしないと落とし穴が存在する。それは, 公平優先はときには全員にとって好ましくない解をもたらすことがあるということである。この典型例は味の好み異なる人々に対して公平優先を行うと全員が不味いという点で公平な味が解として選択されるということである。連合設計では最も味の評価の低い人がある値以上にするという制約条件のもとで公平を図るという定式化を採用することになる。

6. おわりに

本研究は設計のパラダイムとしての「超設計」の理論と技法について論じた。設計とは設計因子とその水準を決定することである。設計因子は原因系変数(独立変数)で, 結果系変数(従属変数)である出力との間に関数関係(因果構造)を有している。この関数構造を二重構造に構成したものが超構造関数である。すなわち, 設計因子の中の特別な因子を超因子にすることによりマクロ的にこの超因子の多項式の構造に構成する。このとき他の設計因子は超因子の各項の係数部分となり, それは超因子以外の設計因子の関数という形を構成する。これを更に高度化すると複数の超因子による多重構造の超構造関数に基づく超設計となる。その典型的な場合が自由出力の頑健設計である。

本研究が特に強調したいのは柔軟設計の重要性である。超設計のための二重構造の関数である超構造関数を構成することができる設計因子が超因子の候補で, これは他の設計因子と積項・交互作用を有するものである。この条件を満たす設計因子はどれでも超因子に指定することができ, このために超設計は設計に関して大きな自由度を持ち柔軟な設計が可能になる。そして, 超因子を自由に指定・変更する設計が柔軟設計である。これまでの設計では最初から超因子を決めて行う設計が多いが, 超因子は事後に決めても良いし, 更には事後に自由に変更が可能である。あるいは既存のデータで求められた推定モデルに積項があればそれを用いて柔軟設計をすることができる。それで柔軟に超因子を指定して超設計を行うことができということを強調したい, もしその結果として得られた解に満足することができるのであればその設計の過程の情報を用いて正式な直積実験を行えばよい。この場合の正式

な直積実験は事前に既存のデータを活用した柔軟設計のトライのもとで得られた有用な情報に基づいて行うことができる。それ故に望ましい実験計画を立てることができるために効果的な設計が可能になる。

実際の設計の中には形状や状態を設計する 경우가少なくない。しかし、これらは因果関係ではなく複雑な関数形状に対する設計となる、とりわけ複雑で困難な設計対象は閉じた図形である。そのための設計の本質はそのままでは陽関数で扱えない関数形状の陽関数化である。これは極座標変換で解決することができることを本研究は示した。さらに加えて図形を区分すればどのような形状も設計することができる。形態設計は加工・鍛造・鋳造・射出成型・半導体製造などの設計においては形状の設計は極めて有用なものである。

連合設計は設計の新たな応用分野を切り開いたものである。設計の本質は関係者の合意形成であるという見方ができ、この観点からは技術的な設計に限らず「決めごと」全般を扱うことのできるアプローチであることを議論した。数値計画法は定式化ができれば後は数理的な求解の問題である。しかし定式化自体は関係者の合意形成の基盤である。このためその基本となる4つのドクトリン(交渉の基本原則)を示してこれらのもとの定式化について論じた。連合設計はこれから超設計において重要なアプローチの一つになるものである。

本研究は設計パラダイムとしての超設計の本質を明らかにするとともにその理論と技法について提案した。超設計を様々な分野で手寄せすることが今後の課題である。

参考文献

- [1] 森輝雄 (2005):『タグチメソッド』の応用と数理, トレントブック.
- [2] 高橋武則(2019):『超設計のパラダイムとメソドロジー』, 横幹, 13, [2], 91-105.
- [3] 高橋武則(2020):『関数の形状が特異な場合の設計』, JSQC 第 122 回研究発表会発表要旨集, 143-146.
- [4] 高橋武則(2021):『多重合成関数を用いた高次関数および複雑な関数の頑健設計』, JSQC 第 126 回研究発表会発表要旨集, 37-40.
- [5] 高橋武則(2021):『複合型の超設計』, JSQC 第 51 回年次大会研究発表要旨集, 159-162.
- [6] 高橋武則(2022):『超設計における関数に関する目標の有無と最適化』, JSQC 第 128 回研究発表会発表要旨集, 91-94.
- [7] 高橋武則(2022):『一般化超設計による自由出力の頑健設計』, JSQC 第 129 回研究発表会発表要旨集, 49-52.
- [8] 高橋武則(2022):『一般化超設計における複合近似』, JSQC第130回研究発表会発表要旨集, 21-24.
- [9] 高橋武則(2022):『超設計の柔軟化と一般化』, JSQC第52回年次大会研究発表要旨集, pp. 129-132.
- [10] 高橋武則(2023):『包括的超設計における構造模型表と最適計画と回帰修正』, SQC第131回研究発表会発表要旨集, 113-116.

- [11] 高橋武則(2023) :” 入出力機構の設計における極値に対する超設計”, JSQC第132回研究発表会発表要旨集, 41-44.
- [12] 高橋武則(2023) :” 超設計における柔軟設計と連合設計と形態設計”, JSQC 第 133 回研究発表会発表要旨集, 41-44.
- [13] 高橋武則(2023) :” 形態設計と連合設計の数理的構造”, JSQC53 回年次大会研究発表要旨集, pp. 111-114.

◆ Discovery Summit Japan 2023 コミッティー

| | |
|---------------------|-------|
| 産業技術総合研究所／電気通信大学 | 遠藤 幸一 |
| 九州大学 | 岸本 淳司 |
| 統計数理研究所 | 高橋 武則 |
| 株式会社村田製作所 | 濱口 勝重 |
| 株式会社リコー | 廣野 元久 |
| Satin Design／産業能率大学 | 三井 正 |

※ 五十音順

◆ Discovery Summit Japan 2023 事務局

SAS Institute Japan 株式会社 JMP ジャパン事業部

〒106-6111 東京都港区六本木 6-10-1 六本木ヒルズ森タワー11階

TEL : 03-6434-3780

E-mail : jpnmktg@jmp.com

<http://www.jmp.com/japan/>

Discovery Summit Japan 2023 論文集

2023年12月1日

初版発行

発行

SAS Institute Japan 株式会社 JMP ジャパン事業部



Discovery Summit Japan 2023 論文集

2023年12月1日発行

発行 SAS Institute Japan 株式会社 JMP ジャパン事業部
〒106-6111 東京都港区六本木 6-10-1 六本木ヒルズ森タワー11階
TEL : 03-6434-3780
E-mail : jpnmktg@jmp.com
<http://www.jmp.com/japan/>