目白大学　経営学研究
第18号　2020年　45-61

論文

設計科学に基づく科学的設計

Scientific Design Based on Design Science

高橋　武則
(Takenori TAKAHASHI)

【要　約】
設計とは設計対象の条件（因子と水準）を決定することである．それはどの因子をとりあげて，そのレベルをいくらにするかということを取り決めることである．設計はしばしば暗黙知のもとで経験的に扱われたり，時には芸術的に扱われたりする．しかし，本研究は形式知のもとで科学的に扱う設計について論じる．そのための概念を本研究は設計科学と呼ぶ．設計科学における形式知とは設計対象における因果関係の関数化のことである．そして，科学的設計とは得られた関数に基づいて数理計画法を用いた最適化で最適解を求めることである．

キーワード：設計科学，科学的設計，模型化，最適化

【Abstract】
A design is to decide about the condition (factors and the levels) of the design target. That's to decide which factor should be taken up, and to decide its level. A design is often handled empirically under tacit knowledge, or it is sometimes handled artistically. However, this paper discusses the design handled scientifically under formal knowledge. A concept for it is called Design science in this paper. The formal knowledge in Design science is the modeling (to make mathematical function) of causality in a design target. And the Scientific design is to find the optimal solution by the optimization using the mathematical programing method based on the obtained function.

Keyword： Design science, Scientific design, Modeling, Optimization

1．はじめに

科学は自然科学と社会科学と人文科学に大別されるが，本研究では自然科学と社会科学の立場に立ち，設計を理学（数理が主軸）と工学（有用性が主軸）と経営学（価値が主軸）のもとで議論する．設計においては理学と工学と経営学は相互に関連している．理学は模型化を司り，工学は条件決定を司り，経営学は価値評価を司る．

商品（売買の対象となる存在）を作って販売し（提供し）使用するには，先ず商品のメカニズム（因果関係）を考えてその模型化が必要である．次に，商品を作るための最適化（条件決定）により決まった条件で製作する．最後に，商品がどれだけの価値を有するのかの価値評価が使用者（顧客）によって行なわれる．本研究はこれらの関係を理論的に考察する．

たかはしたけのり：目白大学経営学部経営学科客員研究員（元教授）
令和元年10月 4 日 受付
令和元年11月30日 改訂
令和元年12月 2 日 採択（紀要編集委員会）

設計はその本質が関数に基づく最適化のためにモデルドリブンのアプローチと言うことができる．そして設計は関数の関数である合成関数に基づく最適化によりその可能性を広げることができる．特に高度な設計の場合には，合成関数の構造が複雑高度化してマトリョーシカ人形のような多重入れ子型構造となる．しかし，近年のコンピュータを用いればこの処理は容易である．本研究は多重入れ子構造の合成関数を用いた設計についてその理論（設計科学）とアプローチ方法（科学的設計）について論じる．

いろいろな世界で行われている条件（因子と水準）を決めることを設計とすれば，その決め方には科学的なものと非科学的なものがある．科学的設計とはきちんと計画的に採られたデータと明確なロジックに基づいた設計のことであり，そうでない設計のことを非科学的設計と呼ぶ．非科学的設計はそれ故に絶対にいけないということではないが，多くの場合に注意が必要となる．

本研究では関数（数式）に基づく数理的最適化を科学的設計と考える．このための考え方を設計科学と呼ぶ．関数は確定的なものもあれば，統計的にばらついたデータから推定される確率的（統計的）なタイプのものもある．そして，設計で用いる関数の多くは合成関数である．特に重要なのは，図 1 に示すマトリョーシカ人形の構造のような多重入れ子構造の合成関数である．本研究はこれを用いた設計について論じる．この議論は，従来の設計を新たな観点で見直して整理を行ったうえで新しい設計アプローチを提案するものである．したがって，本研究はクーンの言うパラダイム（paradigm，野家[8]のいうところの「考え方の枠組み」）という意味で設計を議論する．

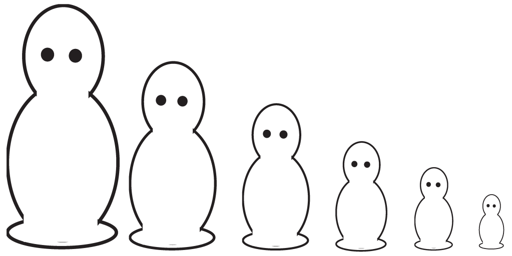

図１　多重入れ子構造の人形（マトリョーシカ人形）

設計のためには因果関係を表現する関数（数式）を作成する必要がある．これはデータにばらつきがある以上は実験計画に基づく実験で採ったデータを統計処理して設計することになる．多くの場合には分散分析を行って最大や最小の条件を求めるという形の設計がなされる．しかし，本研究は目標値を実現することを主題とするために，回帰分析により推定回帰式を求め，これを用いて最適化することを前提としている．なお，このアプローチでも数理計画法により最大化や最小化は可能である．

社会科学のうちのマーケティング分野では実験に基づくアプローチであるコンジョイント分析を行うことがある．これは実験計画法＋数理計画法の観点からすると，量的変数を質的変数として扱っている点をはじめとして，積項（交互作用）や 2 次項を考慮していない点や，実験計画が紋切型であるとか，設計が単純なアプローチ（その本質は数量化Ｉ類）のために柔軟に行えない点などの幾つかの問題点を抱えている．これらの点についても取り上げ，そのための対応についても議論する．

２．設計科学に関する先行研究のレビュー

２.１　因果観察・仮説発想・仮説検証

設計に関する研究の多くは方法論（技法，数理）自体の議論である．その中にあって，設計を科学という立場から体系的な概念として議論しているのは椿の 2 つの研究（［16］，［17］）である．特に［16］では，「科学者は，『使った，効いた，だからよいことだ』という論法を嫌うことから出発している．どのようになっているからよいのだという，プロセスの正当性がなければ納得しないのである．」と述べている．これは科学的設計の本質を端的に示している．

この論法は，医薬の世界では「三た論法」（対照を置かないで「使った，治った，故に効いた」という論法）と呼ばれて問題視されている（椿ら[18]）．昨今では健康食品のCMや広告の分野では常套手段で，毎日多量の「三た論法」がTV，インターネット，新聞，雑誌上に流れている．

この論法はもの造りの世界のエンジニアの間

でもしばしば通用している．ロジックは問題であるにも拘わらず，データ（事実を記録したもの）に基づいたストーリーなので，一見正しそうに見えるために，騙されるエンジニアは少なくないのが現実である．これに対して，本研究は数式と図表による設計プロセスの明快な論理的可視化が科学的設計の必須要件と考え，この立場に立って設計について論じる．

また，椿[16]によれば，Pearsonは次の重要な主張をしていることに注目している．

「科学はその対象が科学的であるから科学となるのではなく，そのプロセスが特定の方法に従っているからこそ，科学足り得るのである．」

職人のアプローチは非科学的で，エンジニアのアプローチは科学的であると言われることが多い．前者は経験をベースにしているのに対して後者はデータをベースにしているというのがその主な論拠である．しかし，データをベースにしているからというだけでそのアプローチが必ずしも非科学的であるとは言えない．職人は経験と言うデータに基づいているので，数値データに比べたら主観的かもしれないが，芸術家のように感性を核としているわけではないからである．

椿[16]は，Pearsonの科学を構築するプロセスは以下の３つであると述べている．

１）事実の周到かつ正確な分類と，これらの事実間の相関関係の観察．

２）この観察を基に想像力を発揮し，有用な科学的法則を減少に付与．

３）この法則が妥当性を持つか否かの検証．

最初のものは観察・実験を意味し，次のものは仮説発想を意味し，最後のものは仮説検証を意味する．そしてPearsonは上記の考えをもとにして科学的な統計学を構築している．

本研究は基本的なスタンスとしては工学の世界の設計に焦点を合わせているので，上記のプロセスは以下のようになる．

１）実験（対象に刺激を与えて反応を観察する行為）によって対象の様子をデータという形で記録し，それを用いて因果関係を関数化する．これは「**因果観察**」である．

２）この関数に基づいて最適化をすることで有用なものを設計する．これは「**仮説発想**」である．

３）この設計したものが予測どおりに実現するかどうかを確認する．これは「**仮説検証**」である．

つまり，設計とは因果関係のメカニズムを応用して有用なものを作るための仮説を発想し，その仮説が本当に実現するかを検証するという一連の手続きのことである．因果関係のメカニズムの把握で重要なことは，効果の有無である．岩崎[3]は，対象に対して行われた処置（刺激を与えること）が，その結果として対象に影響を及ぼした場合に，その処置には効果（effect）があると呼んでいる．

以上のアプローチは一見すると工学の世界に限定されるように見えるが，設計は広く様々な世界で用いられるべきものである．本研究は第７章で，社会科学（とくにマーケティング分野）で行われる仮想実験について取り上げる．これは，コンジョイント分析と呼ばれて盛んに用いられているが，その問題点を明らかにするとともに，どうアプローチをしたらよいかについて具体的に明らかにする．

２.２　設計とアブダクション

工学とは異なり，理学では事実の発見・法則の発見・理論の発見が本質である．これに対してアブダクション（abduction）が重要な役割を果たすということをチャールズ・パースが述べている．ちなみに，科学的思考の方法または様式として一般的には「演繹」と「帰納」の二つが取り上げられてきたが，第三のものとして「アブダクション」登場し，近年ではこれが受容れられるようになった．米盛[21]によれば，アブダクションを提案したパースはアブダクションのことを単に仮説とも呼んでいる．そして，米盛はバートランド・ラッセルの考えに基づいて「仮説を形成することが科学的な仕事の中で最も難しいのであり，偉大な能力が不可欠となる部分である．」と述べている．

工学は有用なものの創造が本質的な目的で，この点では事実の発見・法則の発見・理論の発見を本質的な目的とする理学とは大きく異なる．しかしながら，その目的を達成するための

アプローチはかなり共通している．それは以下に示す科学的な手続きである．

①観察（主に因果関係），②仮説発想，③仮説検証

設計とは仮説発想と仮説検証の合体したものである．それは有用なものを創造する本質的なアプローチである．創造は発明（ないものを創り出す）とも言われ，発見（あるものを見つけ出す）とは異なる．前者はそれまでに存在しなかったものを人為的に（人工的とも呼ばれる）創り出す営みであるが，後者は存在してはいたがそれまで誰にも気付かれなかったものを明確に人々に示すことである．前者では有用性・有益性（usefulness）が重要であり，後者では優雅さ・洗練さ（elegance）が重要と言われている．

工学の守備範囲である有用な新しいものの創造は決して容易ではない．多くの場合には失敗をともない，多数回の試行錯誤が必要となる．しかし，本研究は科学的にアプローチすることで試行錯誤をできるだけ排除して確実に成果を挙げることのできる設計について論じる．しかしながら，設計は仮説であることを強調したい．その理由を次節で述べる．

２.３　設計における実現確認（仮説検証）と回帰修正

設計は仮説でしかないことを強調したい．設計ではLOF（lack of fit：不適合）と誤差という二重の問題点を抱えて最適化を行っているために，数理計画法で精密に最適化をしたとしても，実現確認をするまでは何とも言えないのである．

設計という創造の中身の実体は数理計画法を活用する最適化である．ただし，近似式に基づく創造でありかつ誤差を伴うために，最適化によって得られた最適解はあくまでも仮説でしかない．もし近似式のLOFが大きな場合や誤差のばらつきが大きな場合には，得られた解（最適値）はLOF and/or誤差の影響で実現しないことが発生する．このため，最適解の実現確認は不可欠である．LOFと誤差の影響により実現確認で予測値（設計値）と実現値（データ）が多かれ少なかれずれることは避けられない．もしこのずれが受容れ難いレベルの場合には最後に回帰を用いて修正を行うことにより何としても設計目的を果たす必要がある．このことは，実践型の設計アプローチにおいては最重要項目であり，実務の取り組みでは不可欠の要件である．

本研究では主に誤差（確率誤差）のある実実験の場合を取り上げる．なお，誤差のある場合に用いる式は推定式となるが，本研究では本質を簡潔に議論するために推定されたものであることを示す表現である（ハット記号）は用いずに通常の式の表現を用いる．

実実験では誤差（純粋誤差）ε を無視することはできない．そして実験データから真の模型 $\pi(\mathbf{x})$ を獲得することは困難で，近似式 $f(\mathbf{x})$ を模型化することになる．

そこで，LOFを次のように表現する．

$$\begin{aligned} LOF &= \pi(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x} &= (x_1, x_2, \cdots, x_p) \end{aligned} \tag{1}$$

このとき超設計の基本的模型構造は以下のようになる．

$$\begin{aligned} y &= \pi(\mathbf{x}) + \varepsilon \\ &= f(\mathbf{x}) + LOF + \varepsilon \quad , \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_p) \end{aligned} \tag{2}$$

実践的な設計を行うためには以下の点が重要である．

①ε を必要なレベルまで小さくする．

②クリティカルなLOFが生じない工夫を行う．

③LOFと ε を分離する工夫を行う．

①は改善活動の範疇なので，紙数の都合により本研究ではその議論を割愛して②に焦点を合わせて議論する．その際に③を配慮した実験計画（ResolutionⅣの計画＋同一条件での複数の繰り返し）のもとでのＦ検定や純粋誤差のもとでの予測区間（永田[5], [7]）を利用したt検定（両側検定）を活用する．

ResolutionⅣの計画を用いるのは効果のスパース性（疎性）を強く意識しているからである．すなわち，吉野・仁科[19]が推奨する２次のフルモデルCCD（central composite design：

中心複合計画）は取り上げる因子が多ければ多数の積項（交互作用）と2次項を対象としなければならない．その場合は4因子以上になると実験のサイズが大きくなって，実務的には実験の実施が困難になる．しかし，多くの場合には有効な（無視できない）レベルの積項と 2 次項の存在は少ないというスパース性があるので，［Resolution Ⅳ］＋［中心点での繰り返し 4 回］の計画が有効なのである．このアプローチの場合には，8 因子を取り上げることができるため，その中から有望な 5 ないし 6 因子と可能性のある積項の候補を見出して最適計画あるいは拡張計画（追加実験）で模型化をすることが合理的な戦略である．ただし，効果があることの確度が高い 5 因子に絞られている場合には，CCDを選択肢として考慮する価値がある．

なお，合理的な計画の立て方として良く知られたものにD-最適計画，G－最適計画，I－最適計画がある．ただし，山田[20]が警告するように，最適計画は諸刃の剣で，総実験回数を低減することはできるが，モデルが妥当でないと再現性のない結果を導くことになる．

2．4　テイラー展開と近似式（LOF≒0）

実験を行って近似式（近似模型）を作成しようとする場合に適切な近似模型は 1 次模型か，積項模型か，あるいは 2 次模型かということについて実験の前に明確な情報がないことが少なくない．しかし，テイラー展開のメカニズムを応用すると近似式を用いた合理的なアプローチが可能になる．それは実験計画（DOE：Design of Experiment）に基づいてとったデータで近似模型を作成し，それを用いた数理計画法による最適化という形の設計である．椿[15]によれば，統計科学的法則は近似的な因果関係と呼ばれることもある．すなわち，LOFと ε を踏まえた現実的な因果関係に基づいて設計するのが工学における現実的な設計なのである．

ここでは，分かり易い説明のために一般形の最小形として 2 次の積項を示すことができる 2 変数関数 $\boldsymbol{\pi}(\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2)$の場合を取り上げる．なお，この場合の真の 2 変数関数は未知であるとする．これに関する点（a,b）の近傍でのテイラー展開を以下に示す（永田[6]）．

$$
\begin{aligned}
\pi(x_1,x_2) &= \pi(a,b)+\frac{\partial\pi(a,b)}{\partial x_1}(x_1-a)+\frac{\partial\pi(a,b)}{\partial x_2}(x_2-b)\\
&\quad+\frac{\partial^2\pi(a,b)}{\partial x_1\partial x_2}(x_1-a)(x_2-b)\\
&\quad+\frac{1}{2}\frac{\partial^2\pi(a,b)}{\partial x_1\partial x_1}(x_1-a)^2+\frac{1}{2}\frac{\partial^2\pi(a,b)}{\partial x_2\partial x_2}(x_1-b)^2+\cdots\\
&= c_0+c_1(x_1-a)+c_2(x_2-b)+c_{12}(x_1-a)(x_2-b)\\
&\quad+c_{11}(x_1-a)^2+c_{22}(x_2-b)^2+\cdots
\end{aligned}
\tag{3}
$$

点(a,b)そのものならばyは定数 π (a, b)となる．シミュレーションの場合にはこれが真値となり，実実験の場合にはこれに確率誤差 ε がつく．実験水準はこの点(a,b)から離れるわけであるが，その離れ具合で以下のようになる．このとき，最終的にものを作る場合には，極端に広い水準をとることはありえないことを考慮する．

①ごく近傍ならば 1 次項までで近似ができる．

②少し離れたならば積項までで近似ができる．

③更に離れた場合は 2 次項までで近似ができる．

④かなり離れた場合は 3 次項を要する場合もある．

このことを踏まえて戦略的に設計を行うことができる．

致命的なLOFは絶対に回避しなければならないが，時にはそれを抱えてしまうこともある．上記の①~④に関する見通しを誤るとか，実験計画の際に用いる計画を不適切なものを採用するということが起きるかもしれない．そのような場合の有力な対応方法として回帰修正（高橋[12]，[13]）がある．

2．5　実現確認の結果として解が受容れ難い場合の対応

仮説としての設計（最適化の解）が実現確認を行った結果，それは受容れ難いということがしばしば発生する．その原因は以下のものである．

深刻なLOF and/or 誤差の大きなばらつき

これを解決するために以下のことを行う．

①修正のための因子を 1 つないし 2 つ取り上げる.

②他の因子の水準は最適化の解の水準に固定する.

③修正に取り上げた因子は 3 水準以上にする.

④実験は繰返しをとる.

目的の値からのズレを修正するために①は必要である．修正に当たってはLOFを避けなければならないので②は当然である．そして，修正に使う因子でのLOFを避けるためには非線形に対応するために 3 水準以上の水準をとって 2 次のモデルを視野に入れる. 残るは誤差のばらつきであるが，これは実験を繰り返すことで精度を上げて統計的に対応する.

3. 加工した統計量の模型化の問題と対応

データから情報をとるためには各種の統計量（平均，分散，標準偏差ほか）を用いる必要がある．しかし，加工した統計量（統計量の和，統計量の差，統計量の比ほか）を模型化するのは以下の問題点があるために避けた方が良い.

例として比の場合をとりあげると以下の問題がある.

＊比を構成する分母と分子との対応が分からない.

＊分母と分子の大小の挙動が互いに打ち消し合ったり相乗したりするので模型化が上手く行かない.

＊設計しても不定解の一つを得ることになる.

＊同じ値となる比は無数に存在するため，求解の観点から見ると不定解となり，真のベストを選ぶ最適化を行うことができない（廣野，永田[2]).

＊分母（ばらつき）と分子（平均）の動きに関して，各々の特徴である個別の固有の関数を把握することができない.

＊比は 2 次以上の高次式に対応することができない.

＊関数の性質（微分，積分，極値（極大，極小）ほか）を利用できない.

３.１　静特性の望目特性のＳＮ比における問題

よく用いられる加工した統計量の一つにSN比がある．SN比にはいろいろなものがあるが，その中の一例として静特性の中の望目特性のSN比を取り上げる.

$$\hat{\eta} = -10\log_{10}[\frac{\overline{x}^2}{V}] \qquad (4)$$

宮川[4]が指摘するように，この本質（対数の中身）は変動係数（＝標準偏差/平均）の逆数の二乗となっており，要するに平均の二乗と分散の比である．つまり 2 つの統計量である平均と分散を加工したものである．この場合，廣野・永田[2]やJSQC中部支部産業連携研究会[9]が指摘するように，同じSN比となる平均と分散の組合せは無数に存在するということに注意しなければならない．そして，SN比を用いた設計は交互作用（積項）を無視するために，設計後に実現確認を行うと再現性が得られない場合が少なくないという報告（JSQC中部支部産業連携研究会[10]）がある．この原因は主効果（ 1 次項）のみを取り上げているために生じるLOFが原因で，この点に関しては，本研究は 2 次のフルモデルを視野に入れているために問題は生じない.

３.２　合成関数を用いた合理的な対応

この場合は，平均と分散をそれぞれ模型化し，SN比はそれらの合成関数として扱った方がよい．こうすることで平均と分散のそれぞれの挙動を把握ができ，その上でそれらを反映した形で SN比の性質も利用することができる．SN比にはここで取り上げた静特性の望目特性の場合以外にも様々なタイプのものがあるが，いずれのSN比についても同様のことが言え，もとの統計量の段階で模型化を行って，必要なものはそれらの合成関数として扱うのがよい.

4. 御者・運転手・操縦士と計器盤

４.１　馬車と御者

御者が馬車を走らせる場合にはメカニズム（馬と御者台と牽引部（carriage））が簡単なた

めにそれらの状態が直接的に分かるので，馬車には計器盤がない．泥除けのためのダッシュボード（防護板）が取り付けられているが，そこには計器類は存在していない．目の前の馬たち（エンジン）についてはその様子が息使い，汗のかき方，足並み，時には嘶きなどから分かり，速度は吹き曝しの御者台にいるので五感により確実に把握でき，牽引部の状態も音や振動などで直接理解することができる．

4.2　自動車と運転手

馬車が進化した車には計器盤は不可欠である．運転席の前のダッシュボード（車室前方の壁面）に計器盤であるパネルが設置され，標準的なものとしては図２に示すように，速度計，距離計，タコメーター，燃料計，水温計などが取り付けられている．運転者はこれらから必要な情報を得たうえで刻々と判断を行って適切な運転を行う．自動車の計器パネルの場合にはここに運転に必要な様々な情報（自動車の様々な状態）が表示されている．

4.3　飛行機と操縦士

飛行機は３次元空間を移動するために自動車よりもさらに複雑な意思決定が要求される．現代の飛行機は多種多様な計器を有している．しかしながら，人類初飛行のライト兄弟の初飛行の機体には計器は存在しなかった．[1] そして，その後もしばらくの間は機体に計器は存在しなかった．

初期の飛行機は，空中を飛行しているとは言え，速度も遅く高度も低く直進と簡単な旋回（右旋回，左旋回）だけのため，それは地上を走る馬車の御者とほとんど同じであった．このため，操縦者のライト兄弟は馬車の御者と同様に，吹き曝しの機体の胴体の上で五感により情報を得て飛行機を操縦した．

図3　ライト兄弟の初飛行（[1] より）

しかし，ライト兄弟の初飛行の後，飛行機は短時間で急速な発展を遂げた．速度が速くなり飛行高度は高くなり，飛行距離は長くなり，そして乗客数や積載量は飛躍的に増えた．このために，多種多様な計器なしでの飛行は不可能になった．

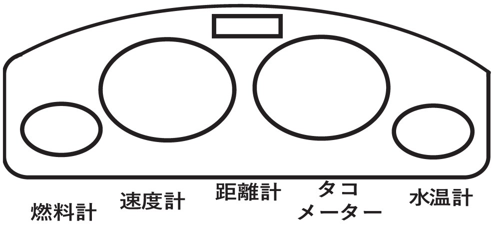

図2　自動車のダッシュボード（計器盤）の計器類

4.4　設計と設計者

設計は総合的な意思決定である．これを合理的に行うためには，QCDSE（品質，コスト，デリバリー，安全，環境）などの情報が欲しい．これらを一目できるようにするためにはこれらの情報をパネル盤の形で表示するとよい．このパネル盤に表示される多数のものは互いに連結をしている．数学的に言えば多重の合成関数となっている．ただし，計器は原則として現在の状態を示しているだけなので，それらは因果連鎖を扱ってはいない．もし，因果連鎖に関して知りたければ，別途に走行記録（各種のレコーダーの情報）を取り出して因果連鎖の観点での解析をしなければならない．

5．超連結関数を用いた設計

5.1　超連結関数（ハイパーリンク関数）

合成関数とは関数の中に関数が存在する入れ子構造の関数である．多重の入れ子構造の例として図１のマトリョーシカ人形がある．しかし，これは極めて単純な樹形型の多重入れ子構造である．複雑な構造として，後ほど議論する図９（3）のような非樹形型の構造（ネットワーク型構造）である超階層構造というものがある．本研究では，これを超連結関数（ハイパー

リンク関数）と呼ぶ．

科学的設計は関数に基づいて最適化するわけであるが，その際に多種多様な関数を定式化に用いる．それらの関数の構造は単純なものから高度に複雑なものまである．本章では，関数というものを計器に見立てて，自動車の運転，飛行機の操縦，経営の意思決定と比較しながら議論する．

5.2　自動車のダッシュボードの計器パネル

設計の本質は自動車の運転に似ている．運転の本質は「2 次元の移動の条件（走る，曲がる，止まる）の決定」である．このために運転席の前のダッシュボードに計器盤（計器パネル：速度計，距離計，タコメーター，燃料計，水温計）があり，そこには運転に必要な様々な情報（自動車の様々な状態）が表示されている．運転者はこれらから必要な情報を得たうえで刻々と判断を行って適切な運転を行う．

図2に代表的な自動車のダッシュボード（計器盤）を示している．ここに登場する計器類は互いに独立な関数（情報）である．必要最小限の情報であるため，これに基づいて走る，曲がる，止まるを行うので，その実体は高度な意思決定を行っているわけではない．つまり，計器の種類も数も少なく，それらはハイパーリンクの構想を持ってはいないのである．

5.3　飛行機のコックピットの計器パネル

飛行機の操縦は自動車に比べて格段に高度な意思決定が要求される．自動車は 2 次元移動であるが，飛行機は 3 次元移動である．そして地上から高く離れた空中のために，天候や風や視界や気流などの様々な条件が運航に関わってくる．このためにコックピット内にある計器パネルは多数の計器類を有している．

コックピット内の計器類は多種多様で，その図を示すことは省略するが，代表的な計器類としては，主だったものだけでも以下のものがある．

＊姿勢指示器，＊速度計，＊高度計，
＊羅針儀，＊旋回傾斜計，＊昇降計，
＊回転計，＊混合比計，＊油温計，＊時計，
＊油圧計，＊航路計，＊吸気圧計，
＊シリンダー温度計，＊電炉切断機　　ほか

このような多数の計器類はあるが，セスナ機などのシンプルな飛行機の場合には基本的に各計器は独立した情報であり，合成関数の関係のものは少ない．しかし，複雑高度にアクロバティックな動きをする戦闘機などの場合には，幾つかの計器の情報の間には合成関数の関係が登場する．そして，それらが非樹形型の入れ子構造になった場合がハイパーリンクの関係である．計器類の種類と数は多く，合成関数の構造を有し，一部がハイパーリンクの関数になっていることが高度な航空機（戦闘機，超大型旅客機，宇宙船ほか）の計器の特徴である．

5.4　経営ダッシュボード

近年の経営トップが頭を悩ましていることは，高度な総合的意思決定を短時間に求められることである．意思決定には判断材料の情報が不可欠である．それら無くしては適切な意思決定は困難である．このために，経営ダッシュボードと言うものが登場してきた．これは複雑で高度な情報の“見える化”（可視化）である．あたかも車の計器盤のように多種の情報がコンピュータ上に登場する．

この場合に表示される情報の多くは，未加工の 1 次情報（原始情報）ではなく，高次に加工された高度な情報（加工に次ぐ加工という高次の加工がなされた情報）である．これは明らかに合成関数であり，しばしば，非樹形構造を有している．そして，ハイパーリンク構造になっているものも少なくない．つまり，レベルの高い経営ダッシュボードの情報はハイパーリンク型構造になっているという特徴がある．これは設計の場合の意思決定（合意形成）にかなり似ている．

5.5　設計におけるコンピュータ画面上の関数パネル

設計の本質は「設計因子とその水準の決定」である．自動車・飛行機における運転手段・操縦手段は設計因子に当たり，自動車・飛行機における計器パネルはコンピュータ画面上の関数の表示に当たる．本稿ではこれを関数パネル（関数表示盤：関数一覧）と呼ぶ．その上に表示されるものは設計因子の関数とそれらの合成関

数であり，これらの関数をパネル関数と呼ぶ．これらは自動車のパネルとは異なり多重の入れ子構造でかつ非樹形構造（ネットワーク構造）の多重合成関数となっている．この多重でかつ非樹形構造の連結を超連結構造と呼び，数理計画法を用いて求解（多目的最適化）することが設計の数理的な本質である．

自動車の運転は運転手が一人で条件決定を行い，飛行機の操縦は二人（操縦士と幅操縦士）で行う．しかし，設計は多数の関係者（ステークホルダー）が相談して条件決定を行う．このため設計は関係者の合意形成である．そして合意形成のためには多様な情報である超連結関数を全員に可視化して見せて情報共有（シェア）と相互理解の整合をはかることのできるコンピュータ画面（関数パネル）は重要である．

設計の使命は「設計因子とその水準の決定」である．自動車・飛行機における運転手段・操縦手段は設計因子に当たり，図２で示した自動車における計器パネルは，コンピュータの場合は図４に示すディスプレイ上の表示画面に当たる．なお，この画面表示は実技演習用の教材である紙ヘリコプターの設計における画面の構造を要約したものである．本研究はこれを関数パネル（function panel）と呼ぶ．これを以後はパネルと呼び，その上に表示されるものは設計因子の関数とそれらの合成関数（composite function）であり，これらの関数をパネル関数（panel function）と呼ぶ．

すでに述べたように，自動車の計器パネルの場合には各々独立に個別の情報が表示されている．ところが，設計のための関数パネル上のパネル関数はそれらの間に多重構造でかつ階層的なネットワーク構造（非樹形構造の多重合成関数）が存在しているために互いに独立ではない．この多重でかつ非樹形構造の連結を超連結構造と呼ぶ．図４は紙ヘリコプターの設計の場合のコンピュータ画面上の関数パネルの構造の例を示しているが，設計に必要な情報が多い場合には，それらをコンパクトでかつシステマティックな配置にすることが重要である．

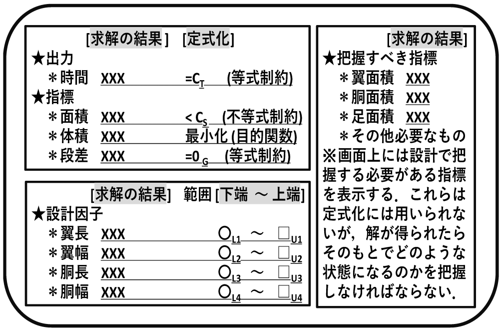

図４　コンピュータ画面上の関数パネルの構造の例

５．６　必須関数・考慮関数・把握関数

超連結とは，多数の関数の間にある構造が他の多数の関数を高度に入り組んだ形で引用するという複雑な多重構造の状態のことである．設計のため関数パネル（コンピュータ画面）上に登場する多くの超連結関数はそのほとんどが多重の超連結の状態になっている．用意した超連結関数が多い場合には，混乱を避けるために関数パネル上には必要最小限のものを表示し，関連する他のものが必要となったら直ぐにそれらをディスプレイ上に表示することが設計ソフトの要件である．もともと超連結関数は設計因子の関数とそれらの合成関数なので，必要なものをその都度呼び出すことはコンピュータを用いれば容易である．このことで漏れなく多面的な配慮ができる．

多数の超連結関数は以下のように分類し使い分ける．

＊必須関数：定式化に不可欠の関数
原則として譲歩しない関数

＊考慮関数：定式化に取り上げるべき重要な関数
必要ならば条件を譲歩する関数

＊把握関数：定式化に取り上げないが解が求まったらそれを代入して様子を把握する関数（解を受容れることが原則）

定式化は必須関数と考慮関数で行い，もし解が得られない場合には考慮関数の条件を譲歩した定式化で再度解を求める．必須関数の譲歩は最終手段とする．なお，把握関数はもし解を代入して受容れられないことになった場合には次

の定式化で考慮関数に昇格させる．これとは逆に，常に楽々と条件がクリアできる考慮関数は把握関数に降格させるとよい．

６．超連結関数の具体的な例

６．１　説明に用いる具体例としての紙ヘリコプター

以下に紙ヘリコプターを例として多種多様な合成関数で用意される超連結関数を具体的に紹介する．

１）退化させた簡易型の単葉機

広く用いられている図５(a)に示すような標準的単葉機は 6 因子を扱うことができる．しかし，多重入れ子構造の合成関数を用いた設計の本質を簡潔に説明するために，単葉機を退化させて最も簡単な 3 因子の場合をとりあげる．

もともと単葉機は，図５(b)に示すように翼部と胴部と足部の 3 部から構成されている．これを図５(c)に示すように簡易化退化させて 2 部の構造にする．この場合の 3 因子の名称を図５(d)および(e)に示す

3 因子の簡易型は理論の本質を簡潔に示せるとともに，実際に行う場合に簡単で短時間で実施することができる．

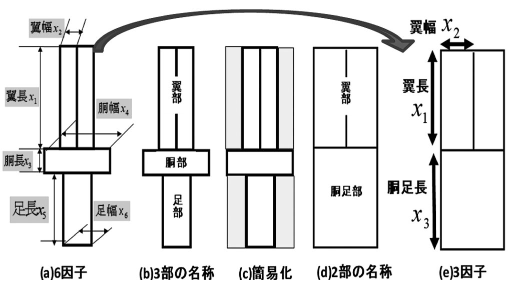

図５　単葉機（６因子）を退化させた簡易型（３因子）

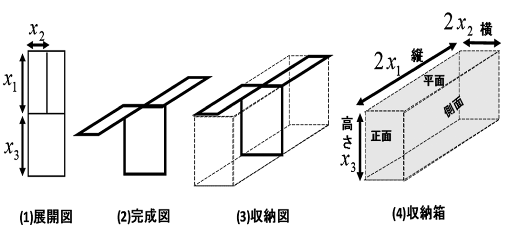

図６　簡易型の展開図と完成図と収納図と収納箱

２）簡易型単葉機の展開図と収納図と収納箱

総合的な設計の議論をするためには，梱包・運搬・保管・搬送・収納にも考慮が必要となり，そのために，完成図・収納図そして収納箱の様子を図６に示している．

３）指標類の例

指標類は多様な視点から用意する必要がある．ここでは例として標準型単葉機の例を図７に示している．設計は単に特性を満たせばよいというものではなく，総合的な評価をしなければならない．ストローク（切断の工数）が多いと時間がかかり，ばらつきが大きくなり，トラブルが発生しやすい．それは段差（ギャップ：隣接する部分の寸法差）によるもので，これを無くすことで一石三鳥（時間，ばらつき，トラブルの低減）となる．ただし，図５と図６に示す簡易型の場合にはこの問題はない．

紙ヘリコプターをコピー用紙のいろいろなサイズ（A3，A4，B4，A5，B5ほか）から切り取る場合に，歩留りが問題になる．この点を考慮しない設計は，無駄な廃材を多く出すことになり歩留りを低くする原因となる．

紙ヘリコプターは飛ぶ時間よりも飛んでない時間の方が圧倒的に長いので収納スペースは大きな問題である．これは収納箱の大きさで決まる．この問題は，同時に梱包・運搬・保管・搬送などの問題と密接に絡んでいる．

６．２　超連結関数の具体的な例

以下に紙ヘリコプターを例として多種多様な合成関数で用意される超連結関数を具体的に紹介する．この設計で必要となる主な超連結関数には時間（飛行時間），面積，体積，段差などがある．

１）時間に関する関数：必須関数

何をおいても時間（滞空時間，飛行時間）が顧客要求を満たさなければならないので，時間は最優先である．これは式（5）に示すように，設計因子の水準幅を広くとらない限り積項までを考慮した関数で十分な近似が可能である．なお，設計因子の水準幅を広くとると，幾つかの因子においては 2 次項が無視できなくなるこ

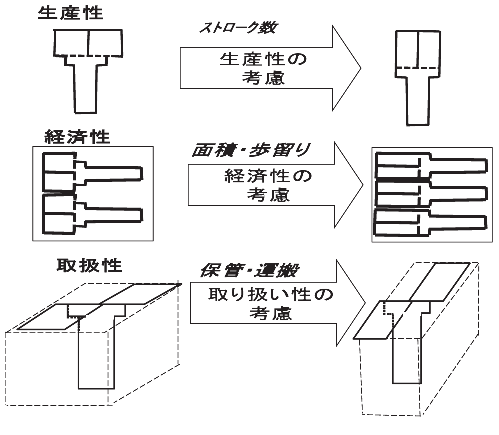

図7 単葉型の場合の指標類の例

とに注意が必要である

$$y = f(x_1, x_2, x_3) = c_0 + \sum_{i=1}^{3} c_i x_i + \sum_{i=1}^{3} \sum_{j>i}^{3} c_{ij} x_i x_j \quad (5)$$

2）材料の観点の指標に関する超連結構造

材料の大きさは材料費とともに，機体の重さにも関連するために梱包・運搬・保管・搬送・収納にも影響する．したがって，これを小さくすることが重要である．面積の構造は図8に示すように比較的簡単な構造である．

$$S_W = f_W(x_1, x_2) = 2x_1x_2 \quad (6)$$
$$S_{B\&L} = f_{B\&L}(x_2, x_3) = 2x_2x_3 \quad (7)$$
$$S_T = f_{S_T}(x_1, x_2, x_3) = g_W\{f_W(x_1, x_2), f_{B\&L}(x_2, x_3)\} \quad (8)$$

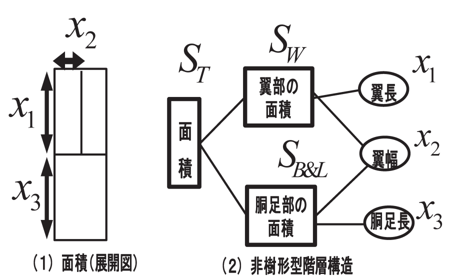

図8 材料の観点の指標に関する超連結構造

3）収納・保管・輸送等の観点の指標に関する超連結構造

収納箱の形状に関する指標は極めて複雑な構造となる．体積はもちろんであるが，正面，平面，側面も収納,保管,輸送などでは大きな問題となる．倉庫の棚，コンテナ，顧客の納戸の状況などが関係し，迂闊な設計をすると滞空時間は顧客要求を満たしていても，総合的に好ましくないものになってしまうことがある．

一般に直方体の物体には6つの面（正面，平面，側面，背面，底面，逆側面）があり，それがどの向きで置かれるかについてはあまり考慮がされないのが現実である．しかし，これらは倉庫の棚や運搬具の構造・サイズと，作業方法の都合や作業のやり易さに大きく影響を与えるものである．したがって，思わぬ問題の発生を防ぐためにはこれらの諸点を考慮した設計が必要である．

$$S_P = f_P(x_1, x_2) = 4x_1x_2 \quad (6)$$
$$S_F = f_F(x_2, x_3) = 2x_2x_3 \quad (7)$$
$$S_S = f_S(x_1, x_3) = 2x_1x_3$$
$$\begin{aligned} V &= f_V(x_1, x_2, x_3) \\ &= g_P\{S_P(x_1, x_2), x_3\} = S_P(x_1, x_2) \times x_3 \\ &= g_F\{S_F(x_2, x_3), x_1\} = S_F(x_2, x_3) \times (2x_1) \\ &= g_S\{S_S(x_1, x_3), x_1\} = S_S(x_1, x_3) \times (2x_2) \\ &= 4x_1x_2x_3 \end{aligned} \quad (8)$$

合成関数の階層とは最初の関数が第1階層で，それらを用いた合成関数が第2階層，同様にその先の合成関数が第3階層となる．なお，この例では，必須関数が時間で，考慮関数は面

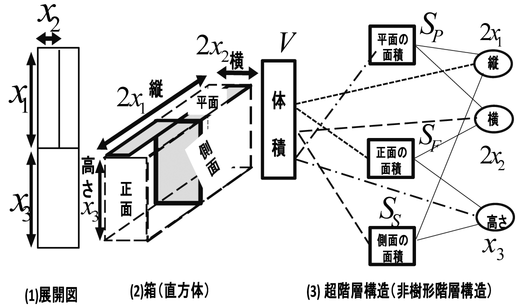

図9 収納，保管，搬送等の指標に関する超連結構造

目的関数 : $f_V(x_1, x_2, x_3) \rightarrow$ 最小

制約条件 : $\boxed{f_t(x_1, x_2, x_3)} = C_{CR\#},\ f_{S_T}(x_1, x_2, x_3) \leq C_{S_T\#}$

$Max\{f_P(x_1, x_2), f_F(x_2, x_3), f_S(\leq x_1, x_3)\} \leq C_\#$

$Min\{x_1, x_2, x_3\} \leq C_\$$

最も重要な特性「時間」

図10　定式化の例

積と体積で他は把握関数である.

このように簡単にあげただけでも幾つもの超連結関数があり，この他にも様々な超連結関数を用意することができるがそれについては省略する．ここで主張したいことは「設計は総合的な決定なので指標は無視できない」ということである．なお，常にすべてのものを用いるわけではなく設計目的にとって必要なものを採用すればよい.

4）超連結関数の定式化の例

ここで超連結関数の定式化の例を実際に紹介する．この例は，倉庫での保管と輸送での積み込みと顧客が未使用時の収納に対する配慮で，どのような向きに置かれてもよいように設計することが目的の条件である.

①時間が顧客要求 $C_{CR\#}$ を満たし，

②面積が $C_{S_T\#}$ 以下で，

③ 3 面（平面,正面,側面）の面積の最大が $C_\#$ 以下で，

④縦と横と高さの最大が $C_\$$ 以下という制約のもとで

⑤体積を最小にすることを考える.

この場合の定式化は図10のようになる．ただし，この定式化においては，設計因子の制約条件（実験の水準範囲）の表示は省略している.

6．3　要約関数

コンピュータ画面上に登場させるべき重要な関数には，式（13）から式（17）に示すような幾つかの要約関数がある．これは要約統計量の関数版で，これを用いると質的超因子が多水準の場合を容易に扱うことができ，定式化および求解の結果の理解が容易になる.

撹乱因子が多水準の場合や多因子の場合を扱うにはダミー変数の構造がかなり複雑になり対応が困難になる．その場合には，以下に示す要約関数が有用である．これはデータに関する要約統計量の発展した関数版のもので，これらもまた数理的には多重の合成関数である．代表的なものとして以下の 5 種類の要約関数がよく用いられるが，これらはコンピュータを用いれば容易に扱うことができる．なお，左上添字は撹乱因子の水準を意味し，式（13）から式（17）においてはk水準の場合を示している.

このような要約関数を用いると，頑健設計において撹乱因子の水準が多い場合に以下に示すように最適化のための定式化が簡単かつ明快になる.

$$f_{Max}(\mathbf{x}) = Max\{{}^1 f(\mathbf{x}), \cdots, {}^k f(\mathbf{x})\} \tag{13}$$

$$f_{Min}(\mathbf{x}) = Min\{{}^1 f(\mathbf{x}), \cdots, {}^k f(\mathbf{x})\} \tag{14}$$

$$f_{Ran}(\mathbf{x}) = g_{Max}(\mathbf{x}) - g_{Min}(\mathbf{x}) \tag{15}$$

$$f_{Ave}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{k} {}^i f(\mathbf{x}) / k \tag{16}$$

$$f_{SD}(\mathbf{x}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} \{{}^i f(\mathbf{x})\} - f_{Ave}(\mathbf{x})\}^2 / (k-1)} \tag{17}$$

撹乱因子における水準間の乖離というものは範囲（Range）という形で扱うことができる．水準が異なると最大と最小の差が開き，これはばらつきである乖離を表している．これを範囲として扱い，できれば 0 にするか，ある値以下にするということが乖離の減衰の定式化である．その上で平均を最適化（最大化・最小化・目標接近化）する.

頑健設計において要約関数を用いると，ミニマックス（Minimax）やマックスミニ（Maxmin）の設計が可能になる．さらには，Max-Max, Min-Min, Ave-Max, Ave-Minなどのような多様で高度な設計が可能になる．なお，頑健設計において注意すべきことは強く乖離の減衰に拘らないことである．頑健性に強く拘るとその制約が強く圧迫して平均が委縮した解になることが多い.

6．4　高次の関数に基づく設計

高次の関数に関する設計を行う場合には，合成関数を用いることで高度な最適化（設計）が可能になる．例えば対象が 3 次関数の場合は，その 2 つの極値や変曲点が係数の関数で表現

できる．したがって，もともとの 3 次式の係数に関して設計因子の関数が得られていれば，それらを用いて 2 つの極値や変曲点が合成関数として表現ができる．そしてさらには，それらの値を用いて極値間の左右差や上下差，さらには両者の比である極値間勾配を合成関数として表現することができる．このように，多重の合成関数を用いて非常に高度な設計をすることが可能になる．ただし，関数形が複雑すぎる単純な 3 次式では描写が困難な場合には 2 つの 2 次式に分解すること（高橋[11]）も選択肢である．

7．コンジョイント分析から仮想実験への進化

7．1　コンジョイント分析の問題点

社会科学のうちのマーケティング分野ではコンジョイント分析を行うことがある．これは価値評価（満足度評価）の実験であるが，実験計画法＋数理計画法の観点からすると以下の問題を抱えている．

＊量的変数を質的変数として扱っている．
＊ほとんどの場合積項（交互作用）を考慮していない．
＊ 2 次項を考慮することがほとんどない．
＊構造模型表を作成していない．
＊最適計画を活用していない．
　・模型はきちんと確保し回答の負担を少なくする
　・完全な直交に拘る必要はない．
＊層別を扱うことがほとんどない．
＊最適化は数量化 I 類で行っている．
　・実験点解と格子点解しか扱えない．
　・内挿解を扱えばより良い解が得られる．
　・外挿解を扱えば画期的な良い解や新しいヒントを得ることができる．
＊複数の層に対して以下に示すような高度な定式化を行っていない．
　・平均の最大化，・最小の最大化
　・部分的な条件付きの最大化，・最大の最大化
＊実現確認でグラデーションの効き方をしていない
＊特性要因図と因子役割図を用いていない
　最初に概念図を作成すべきである
＊概念図と特性要因図と因子役割図を用いていない
　顧客のプロセスと提供者側の対応

本章では上記の問題点に対処できる方法を具体的に議論するために，スマートフォンの設計の場合を例[14]としてとりあげる．この例では 2 つの層（漫画をよく読む層と漫画をあまり読まない層）があることが重要である．紙数の都合により，議論を簡潔にするために，どちらとも言えない層は解析の対象から外している．

7．2　因子と水準の設定

仮想実験は質問紙による実験の形式で行う．質問紙実験の因子は解析結果に基づく検討から表 1 のように X1「容量」，X2「画面」，X3「補償パック」の 3 つを設定した．このときの水準は最少と最大の定量の数値を用意する．質的因子ではなく，量的因子を用いて質問紙実験の水準を設定することで，より詳細で具体的な提案を導き出せる可能性が高まる．

取り上げる因子の数が増えた場合には，積項と 2 次項についてそれらの存在の有無を検討して明らかにすれば，それに基づいて最適計画[20]を立てると少ない実験回数で合理的な実験を計画することができる．なお，最適計画は，

表1　直交表L8

No. ＼ 因子	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

表2　因子と水準

因子	第一水準	第二水準
X1　容量　→ [1]	32G	256G
X2　画面　→ [2]	4.5インチ	5.5インチ
X3　補償パック　→ [4]	3パック	5パック

表３　直交表L８に基づく実験の条件

No	X1容量	（容量価格）	X2画面	X3補償パック	（保証価格）
1	32	85,000	4.5	3	500
2	32	85,000	4.5	5	700
3	32	85,000	5.5	3	500
4	32	85,000	5.5	5	700
5	256	100,000	4.5	3	500
6	256	100,000	4.5	5	700
7	256	100,000	5.5	3	500
8	256	100,000	5.5	5	700

No	容量（容量価格）	画面	補償パック（保証価格）
1	32GB（85,000円）	4.5インチ	3サービス（500円）
2	32GB（85,000円）	4.5インチ	5サービス（700円）
3	32GB（85,000円）	5.5インチ	3サービス（500円）
4	32GB（85,000円）	5.5インチ	5サービス（700円）
5	256GB（100,000円）	4.5インチ	3サービス（700円）
6	256GB（100,000円）	4.5インチ	5サービス（500円）
7	256GB（100,000円）	5.5インチ	3サービス（700円）
8	256GB（100,000円）	5.5インチ	5サービス（500円）

近年多くの統計ソフトで簡単に活用することが可能である．

７．３　プロファイルカードの作成

１）直交表の作成

３因子を取り上げる場合には表１のＬ８の直交表を用いる．表２のように因子と水準が決まったら，Ｌ８の表を用いて３因子の水準の組合せである８回（８通り）の実験に関して，表３のように，直交実験の計画とそれに対する具体的な実験条件を作成する．

２）プロファイルカードの作成

表３の計画に基づき，実験で用いる８枚のプロファイルカードを作成する．プロファイルカードの例を図11に示している．これは，イラスト等を入れ，視覚的にわかりやすく表示するよう工夫する．とりあげるものによっては動画を用いることも有効である．

３）実験の実施

８枚のプロファイルカードを吟味して１位から８位まで順位を行い，その後以下のように評価点を定める．

評価点＝９－順位

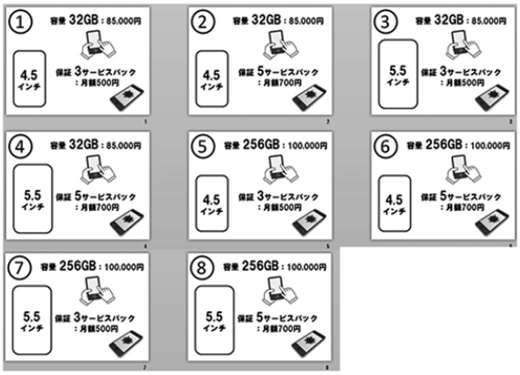

図11　プロファイルカードの例

７．４　データ解析

ここで扱うデータ数は，２つの層とも10名である．ただし，実務の場合には結果の信頼性を高めるために被験者の人数を増やした方がよい．

＊漫画をよく読む人10人のプロファイルカードの①から⑧の各平均値
①2.2，②2.1，③6.1，④5.9
⑤2.8，⑥2.9，⑦6.8，⑧7.2

＊漫画をあまり読まない人10人のプロファイルカードの①から⑧の各平均値
①5.9，②5.6，③7.3，④7.2
⑤2.8，⑥2.9，⑦2.2，⑧2.1

１）重回帰分析

目的変数に満足度得点，説明変数に各因子とその交互作用を確認できるよう設定を行い，ステップワイズ法によるあてはめの要約（重回帰分析）を行った．その結果を図12と図13に示す．

重回帰分析の結果，標準偏回帰係数（標準β）を確認すると，漫画をよく読む層では画面の大きさが最も重要（符号は＋）であり，次いで容量の大きさが重要（符号は＋）であった．一方，漫画をあまり読まない層では容量の大きさが最も重要（符号は－）であり，次いで画面大きさが重要（符号は＋）であった．またこの層では，容量と画面サイズには交互作用（符号は－）がみられた．注意すべきことは，容量に関しては符号が異なっている（真逆である）ということである．これは設計の際に微妙な問題（「あちら

あてはめの要約

R2乗	0.995387
自由度調整R2乗	0.993542
誤差の標準偏差(RMSE)	0.176068
Yの平均	4.5
オブザベーション(または重みの合計)	8

分散分析

要因	自由度	平方和	平均平方	F値
モデル	2	33.445000	16.7225	539.4355
誤差	5	0.155000	0.0310	p値(Prob>F)
全体(修正済み)	7	33.600000		<.0001*

パラメータ推定値

項	推定値	標準誤差	t値	p値(Prob>|t|)	標準β	VIF
切片	-16.04643	0.630699	-25.44	<.0001*	0	.
X1容量	0.0037946	0.000556	6.83	0.0010*	0.207379	1

図12　漫画をよく読む人の重回帰分析結果

あてはめの要約

R2乗	0.998276
自由度調整R2乗	0.996983
誤差の標準偏差(RMSE)	0.122474
Yの平均	4.5
オブザベーション(または重みの合計)	8

分散分析

要因	自由度	平方和	平均平方	F値
モデル	3	34.740000	11.5800	772.0000
誤差	4	0.060000	0.0150	p値(Prob>F)
全体(修正済み)	7	34.800000		<.0001*

パラメータ推定値

項	推定値	標準誤差	t値	p値(Prob>|t|)	標準β	VIF
切片	5.0714286	0.438719	11.56	0.0003*	0	.
X1容量	-0.017857	0.000387	-46.19	<.0001*	-0.95893	1
X2画面	0.4	0.086603	4.62	0.0099*	0.095893	1
(X1容量-144)*(X2画面-5)	-0.009821	0.000773	-12.70	0.0002*	-0.2637	1

図13　漫画をあまり読まない人の重回帰分析結果

立てれば，こちらが立たぬ」というトレードオフの問題）となる．複数の層が存在する場合にはしばしばこの種の問題を抱えることになる．

なお，この実験は直交実験なのでVIFは必ず1.0になる．これらは図12と図13で確認することができる．これは解析を行う場合や設計をする場合にはたいへん優れた性質である．

2）得られた式の検討

重回帰分析の結果，得られた式は層によって異なる．それぞれの式は以下の通りである．

＊G 1：漫画をよく読む人の場合

$$y = -16.04043 + 0.0037946x_1 + 4x_2 \quad (18)$$

＊G 2：漫画をあまり読まない人の場合

$$\begin{aligned} y = \ & 5.0714286 - 0.0178576x_1 + 0.4x_2 \\ & - 0.009821(x_1 - 144)(x_2 - 5) \end{aligned} \quad (19)$$

G 2 では積項（交互作用）が存在している．これは変数を質的に扱った場合には見出すことは不可能である．そして，それ故に解釈を間違えかつ最適化も誤るのである．

これらの式から，どちらの層ともＸ２の画面は大きい方がよいと読み取ることができる．漫画をよく読む人はその要求が強く，漫画をあまり読まない人はそれほど強くはないという異なった特徴はあるが，画面の大きさについては最も大きいサイズ（5.5インチ）で決定となる．

しかし，Ｘ１の容量については層による差が大きく，傾向は真逆である．したがって，施策を設計する場合には慎重な検討が必要である．もし，各々の層ごとに提案を考えるのであれば以下のように異なった施策となる．

漫画をよく読む人の場合の容量：256GB

漫画をあまり読まない人の容量：32GB

仮に，容量を256GBにすると各層の満足度は以下のようになる．

漫画をよく読む層：6.925

漫画をあまり読まない層：2.15

このとき両者の差は大きく，漫画をあまり読まない人たちの満足度はかなり低いといえる．このためこの条件を統一の施策として採用することはできない．

これに対し，仮に容量を32GBにすると各層の満足度は以下のようになる．

漫画をよく読む層：6.075

漫画をあまり読まない層：7.25

このときの両者の差は比較的小さく，漫画をよく読む人にも受け入れられそうである．よって，統一の施策を検討する場合には，容量を32GBにすることがひとつの選択肢となり得る．

７．５　提案施策の設計

漫画をよく読む人は，スマートフォン自体をよく使うヘビーユーザーであることから，その他のアプリやゲーム，音楽等を楽しむ上で大容量である方が望ましく，結果として大容量の方がお得感を感じられるプランであると考えられる．漫画をあまり読まない人は，スマートフォンではなく従来の携帯電話でも良いという人も含まれている可能性がある．こちらの層では，スマートフォンの多機能は求めず，容量も最小限でコストを抑えられることを希望していると推測できる．

得られた式（18）と式（19）の検討から，ス

マートフォンの容量を統一する場合は最小容量の32GBとし，オプションで容量を増やせるプランを用意することができるとよい．すなわち，スマートフォンの開発と販売の戦略においては，ヘビーユーザーとそうではない人がそれぞれ選択できるよう，どちらも経済性やお得感が感じられるプランを設計することが望ましいといえる．

７.６　多様な定式化

前節ではそれぞれの層ごとに個別に最適化を行って，その解を他の層に代入して吟味を行っている．しかし，これに対して6.3節で述べた要約関数である式（13），式（14），式（15），式（16）を用いれば高度な最適化することができる．このアプローチは層がk個の場合に対して対応することができるので汎用性が高い．

近年のマーケティングでは人々のライフスタイルや価値観の多様化に伴ってマーケットのセグメンテーション（細分化）が加速しているので，伝統的な層別である２層（男・女とか老・若など）や３層（ハイエンド・ミドルレンジ・ローエンドなど）などでは対応できない場合も少なくない．層が多層の場合でも要約関数は合理的にかつ容易に定式化ができて最適解を簡単に手に入れることが可能である．

代表的な設計戦略のもとでの定式化の例としては，以下に示すようなものがある．

（1）平均を最大化する．
　全体平均の最適化
（2）最小を最大化する．
　不利な者の最適化（弱者救済）
（3）最大を最大化する
　トップ層の最適化
（4）範囲をある値以下の制約のもとで平均を最大化する．（公平さを確保しながら全体平均の向上）

７.７　確認調査

多群質問紙調査および質問紙実験に基づくアイディアの設計ができたら，一番の理想は，そのアイディアが商品化されることである．しかし，商品化の前に，確認調査を行なうことでアイディアがスマートフォンユーザーに本当に受け入れられるかどうか見極めることができる．

確認調査では，設計案のスマートフォン（以下ではスマホ）について，いくつかの視点で評価してもらう．

［A］このスマホに興味がありますか？
［B］このスマホを使ってみたいですか？
［C］現在のスマホの買換え時はこれを購入しますか？
［D］すぐにでもこのスマホを購入したいですか？

このように，段階を踏んで質問項目を用意するとよい．こうすれば，例えば「このスマートフォンに興味は持ってもらっているが，すぐに購入には至らないレベルである」という確認もできる．もし，確認調査の結果，そもそも興味を持ってもらえないような結果となったら，もう一度，調査や実験を見直し，やり直すこともできる．

８．おわりに

本研究では，設計科学とそれに基づく科学的設計について論じた．その本質は因果関係の模型化（関数化）にあり，それをもとにいろいろな合成関数を作成して定式化することで設計の高度化とワイド化を可能にした．

本研究で述べた多重入れ子構造の合成関数を用いた設計は実務において有用である．設計は関数の関数である合成関数に基づく最適化というアプローチで柔軟でかつ配慮の行き届いた設計が可能である．特に高度な設計では超連結関数が登場する．近年のレベルアップしたコンピュータを用いれば，本研究が提案するアプローチの実施は極めて容易である．

今後の課題は，本研究で提案した多重入れ子構造の合成関数を用いた設計，とりわけ超連結関数を用いた設計を広く実務に適用することである．

【参考文献】

［1］デヴィッド・マカール（秋山勝訳）（2017）：「ライト兄弟－イノベーション・マインドの力－」，草思社．
［2］廣野元久，永田靖（2013）：「アンスコム的な

数値例で学ぶ統計的方法23講 －異なるデータ構造から同じ解析結果が得られる謎を解く－
［3］岩崎学（2015）:「統計的因果推論」，朝倉書店.
［4］宮川雅巳（2000）:「品質を獲得する技術」，日科技連出版社.
［5］永田靖（1996）:「統計的方法のしくみ」，日科技連出版社. .
［6］永田靖（2005）:「統計学のための数学入門30講」，朝倉書店.
［7］永田靖（2009）:「統計的品質管理」，朝倉書店.
［8］野家啓一（1998）:「クーン」，講談社.
［9］JSQC中部支部産業連携研究会（2010）:「開発・設計における“Qの確保”」，日本規格協会.
［10］JSQC中部支部産業連携研究会（2015）:「開発・設計に必要な統計的品質管理」，日本規格協会.
［11］高橋武則（2016）:”設計における全体と部分”, 目白大学研究紀要, 第14号, pp. 63-84.
［12］高橋武則（2018）:”HOPE理論に基づく戦略的包括型設計”,目白大学研究紀要，第16号，pp. 39-54.
［13］高橋武則（2019）:”問題解決と課題達成のための包括設計法”，日本品質管理学会第119回研究発表会発表要旨集，pp.153-156.
［14］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.
［15］椿広計（2006）:「ビジネスへの統計モデルアプローチ」，朝倉書店.
［16］椿広計（2006）: “統計科学の横断性と設計科学への寄与”，「横幹」,1,［1］, 22-28.
［17］椿広計,河村敏彦（2007）:「設計科学におけるタグチメソッド」,日科技連出版社.
［18］椿広計，岩崎正和（2013）:「Rによる健康科学データの統計分析」，朝倉書店.
［19］吉野睦，仁科健（2009）:「シミュレーションとSQC」，日本規格協会.
［20］山田秀（2004）:「実験計画法－方法編－」，日科技連出版社.
［21］米盛裕二（2007）:「アブダクション－仮説と発見の論理－」，勁草書房.