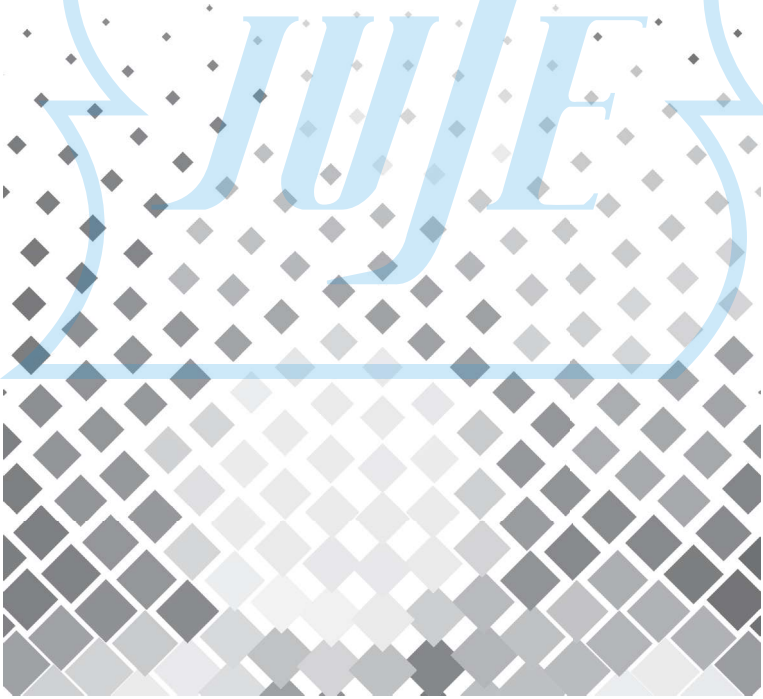
無断使用をお断りします。日科技連出版社

応答曲面法の実践活用

JUSE-StatWorksによる
実験計画の作成と解析のテクニック

渡邉克彦・佐々木成実［著］



日科技連

無断使用をお断りします。日科技連出版社

推薦のことば

「観察データ」「実験データ」という言葉がある．前者は，意図的に介入して収集したデータではなく，集まったデータである．いわゆる「ビッグデータ」もそうである．後者は，ある目的のために計画的に集めたデータである．

データ解析の大きな目的の一つは，興味のある変数 y(目的変数，特性値)を予測したり，制御したりすることである．そのために，他の変数 x_1，x_2，…，x_p(説明変数，要因)に基づいて y との関係をモデル化し，予測や制御に役立てる．

予測とは，変数 y の将来実現する値を推測することである．このとき，説明変数と目的変数の間に必ずしも因果関係を必要としない．「観察データ」に基づいて予測はできる．それに対して，y を制御するためには，x_1，x_2，…，x_p から y への因果関係の存在が必要である．因果関係を捉えるためには「実験データ」に基づく解析を行わなければならない．

一般に，「観察データ」では，x_1，x_2，…，x_p と y の間に複雑な関係が存在する．それは，x_1，x_2，…，x_p と y との直接的な関係だけでなく，観測されていない別の変数との関係や，x_1，x_2，…，x_p の中での従属関係である．前者は間接効果や擬似相関を生み出す．後者の従属関係が強い場合には x_1，x_2，…，x_p のどの変数が y にどの程度の影響を与えているのか判断しにくくなる．従属関係が極端に強くなると多重共線性が生じ，推定できなくなったり，指定できてもその精度が悪くなる．

多変量解析法や機械学習の方法を用いれば「観察データ」に基づいて予測を行うことはできる．本書の著者の渡邉克彦氏は『上手な機械学習と統計的品質管理の使い方入門』(2021 年，日科技連出版社)を上梓して，実務におけるデータ解析のノウハウを実に巧みに解説した．この書籍は高く評価され，2021 年度の日経品質管理文献賞を受賞した．

一方，「観察データ」だけで因果関係を解明することは困難である．因果関係を明らかにして制御するには，擬似相関や説明変数間の従属性を断ち切って，目的変数に対する各説明変数の影響度合いを検討できる「実験データ」が必要

 無断使用をお断りします。日科技連出版社

になる．

実験計画法は，「実験データ」を採取する計画段階と，得られたデータの解析段階の２つのフェーズからなる．実験計画法は多変量解析法や機械学習の方法では実現できない制御や介入のための統計的方法論である．

わが国では，1950 年代から実験計画法の教育や技術課題への応用が広く普及してきた．技術者は，要因配置実験，直交表実験などを使いこなし，日本製品の高い品質を確保してきた．それに対して，既存の実験計画法の標準的手法をより発展させた方法として応答曲面法がある．これは，回帰式のようなモデル化を行うことにより，「実験回数が削減される」「解析結果の解釈が容易になる」というメリットがある．

本書は，応答曲面法の実践的な活用方法を明快に解説している．解析ソフトを用い，まず手を動かしてデータ解析を行うという著者の前著と同様のスタンスを採り，読者が無理なく実践できる構成となっている．数式を極力用いずに重要な概念と注意点を過不足なく提示し，さらに理解を深めるべき内容はコラムとして整理し，具体例を通じて丁寧に解説している．これらは，著者のトヨタ自動車における長年の実務経験に基づくものであり，随所に著者ならではの実践的センスが光る．

本書は，実験計画法を学んだ経験はあるものの，いまひとつ物足りなさを感じている読者にとって格好の一冊である．本書を通じて一段のステップアップを図り，実務の課題解決に取り組む契機となることが期待される．

2026 年 9 月

早稲田大学名誉教授　永田　靖

無断使用をお断りします。日科技連出版社

ま え が き

トヨタ自動車では統計的品質管理(SQC)を問題解決に有効なツールとして位置づけ，1949 年より普及促進に向けた活動を実施している．社内教育としての SQC 講座を開設し，統計の基礎をはじめ，多変量解析，実験計画法，信頼性工学などを体系的に扱ってきた．さらに，2015 年には機械学習も加わり，これらをデータサイエンスの手法群として自業務の問題解決に活用することで，ものづくりにおける品質と技術力向上につなげている．

これらの手法群の中でも多変量解析と機械学習は特に親和性が高く，実践活用において両者の位置づけや使い分けを整理する必要性が高まっていた．そこで筆者は『上手な機械学習と統計的品質管理の使い方入門』(2021 年，日科技連出版社)を執筆した．両者におけるデータ分析は，取得済である少量～大量データに対して，可視化，層別，要約，予測，分類，外れ値検出，相関分析などを目的とする点に特徴がある．

一方，ものづくりの現場では「もっといいクルマ」をめざして，新製品や新技術の開発を日々進めている．これは世の中にないものを作り出していく挑戦でもある．このため，現時点で手元にデータがなく，実機実験やシミュレーション実験で新たに取得することも多い．ビックデータの時代が到来し，自ずとデータが集まる環境が整ってもこのような状況は十分にあり得るのである．将来に向けて製品や技術が高度で複雑化していく中，技術者が構築した仮説を一つひとつ実験で検証し，新しい知識や汎用的な知見・ノウハウを得ていくのである．

このとき，ただやみくもに実験をするのは非効率であり，場合によってはせっかく実験したのに，本来知りたかった情報が得られないという可能性もある．そのためにも，本書で紹介する実験計画法を使い，目的となる情報を確実かつ効率的に得られるよう実験し，その結果，開発期間の短縮など競争力強化につなげることが重要と考える．

この実験計画法であるが，当社で研修を立ち上げた 1960 年以降，長らく関数電卓を使っての要因配置実験や直交表実験が中心であった．しかし，PC が

無断使用をお断りします。日科技連出版社

進化した2000年代に入ると，設計者を中心により効率的な実験回数や多特性を同時に最適化できる応答曲面法が求められるようになった．

応答曲面法は，1951年にBoxとWilsonにより提唱され，米国で実用化された手法である．われわれがその研究に着手した2001年当時，国内では応答曲面法はほとんど知られておらず，米国や欧州を中心に研究と活用が進められていた．この理由は，国内では技術者一人ひとりが勉強して使う道具だったため，それに適している要因配置実験，直交表実験が普及していたことにある．一方，欧米は統計学の専門家が実験を指導するための道具であったため，より効率的な応答曲面法が発展した．その後，国内でも，エンジン制御などの分野での論文発表によりその名が知られ，当社でもエンジン部門などで関心が高まりつつあった．このような状況を受けて，SQCに精通した社内スタッフが集い，大学の研究者の方々や社外有識者のアドバイスを得ながら応答曲面法を研究した．その結果，2004年に研修を立ち上げることができた．

その後も応答曲面法の普及促進を続けた結果，20年近く経過した現在ではその活用が定着している．例えば，当社では毎年データ分析の発表会を開催している．各部・各領域から優れた事例を一堂に集めて発表し，多くの参加者がより良いデータ分析の活用方法を学ぶ場である．近年のある発表会では全17の事例中，実に9事例が応答曲面法を活用していた．

このように当社では普及している応答曲面法であるが，先述のように海外で発展してきたこともあり，日本国内ではなじみが薄く，研修自体が少ないのが現状である．そこで今回，当社の技術者が使う応答曲面法の使い方や活用ノウハウをまとめ，ものづくりにおける品質や技術力向上につなげたいとの想いから出版するに至った．本書では詳細な解析手順まで示しているので，読者の皆様にはぜひ実践し，効果を実感いただけると幸いである．

本書の構成は以下のとおりである．

第1章では，実験計画法とは何かについて述べるとともに，従来手法である要因配置実験，直交表実験について解説する．

第2章では，応答曲面法の概論として，実務で活用するメリットならびに従来手法との違いを解説する．

無断使用をお断りします。日科技連出版社

第 3 章では，応答曲面法に使われる代表的な計画の一つである中心複合計画を取り上げる．

第 4 章では，中心複合計画に沿って実験した後の解析手法である応答曲面解析について解説する．

第 5 章では，応答曲面法の大きな特徴である，2 つの特性を同時に最適化する方法を解説する．

第 6 章では，技術者が保有する固有技術を活用しながら，中心複合計画よりも実験回数を少なくできるD−最適計画を解説する．

第 7 章では，応答曲面解析の結果，新たな知見が得られた場合に，D−最適計画を用いて追加実験を効率的に行う方法を解説する．

第 8 章では，実験因子の種類が多い場合に，影響の大きい因子を効率的に絞る方法であるプラケット・バーマン計画を解説する．

第 9 章では，最適解を得る際に頑健性(ロバスト性)を考慮するための方法論について述べる．

そして，第 10 章では総合演習を行う．

また，最後の付録ではD−最適計画を適用した際に発生する因子間の相関の影響を正則化で回避しながら，変数選択を行う方法について説明する．実務においてD−最適計画を探索的な実験で使われることが散見されるため，このほど付録に掲載した．

加えて，章間には，筆者が長年社内外の実験計画法に関する実践支援に携わった経験から，よくある質問や実務で陥りやすい罠をコラムとしてまとめたので，これらも参考にしていただきたい．

なお，応答曲面法の解析ソフトウェアは，JUSE−StatWorks を使用している．同ソフトは手軽に応答曲面法のデータ分析を知り，実践での活用につなげられるツールである．JUSE−StatWorks を使ったことがない方は，日本科学技術研修所のウェブサイトから本書の内容に対応した無料トライアル版(扱えるデータは最大 30 変数×200 サンプル)を利用できる．また，上記のウェブサイトには JUSE−StatWorks の製品概要や活用事例なども掲載されている．本書を活用する際にはぜひ「目次」の直後(p.xiv 参照)にある「JUSE−StatWorks /V 5 総合編のご案内」を見たうえでダウンロードしていただきたい．

無断使用をお断りします。日科技連出版社

最後に，本書の執筆にあたり，実に多くの皆様から貴重なご助言や温かいご支援を賜った．これらのご厚意は，筆者が執筆を進めるうえで大きな支えとなった．

特に，早稲田大学名誉教授の永田靖先生には，ご多忙の折にもかかわらず「推薦のことば」をご寄稿いただくとともに，原稿の細部に至るまで丁寧にご確認いただき，本書の完成度を高める数々の有益なご助言を頂戴した．また，日本科学技術研修所の犬伏秀生氏にも，執筆を進める過程において貴重なご示唆をいただいた．さらに，日科技連出版社の戸羽節文社長，鈴木兄宏取締役，ならびにトヨタ自動車の小林淳一部長，大島光博前室長には，本テーマの重要性をご理解いただき，本書執筆の貴重な機会を与えていただいた．加えて，前部長の北村晋氏，同僚の中野裕一郎氏，山田芳幸氏，日本品質管理学会中部支部東海地区若手研究会のメンバーの方々からも有益なご意見を多数賜ることができた．

本書の完成にご尽力いただいたすべての皆様に，ここに改めて深甚なる謝意を表するとともに，今後とも問題解決力の向上に資する議論と研鑽において，引き続きご指導ご鞭撻を賜れば幸いである．

2026 年 9 月

著者を代表して　渡邉克彦

無断使用をお断りします。日科技連出版社

目　　次

推薦のことば　*iii*

まえがき　*v*

第 1 章　実験計画法とは——*1*

1.1　実験計画法の歴史，なぜ必要なのか ……*1*

1.2　実験計画法の進め方 ……*3*

1.3　二元配置実験のケーススタディ ……*7*

1.4　直交表実験のケーススタディ ……*11*

第 2 章　応答曲面法とは——*25*

2.1　従来の実験計画法 ……*25*

2.2　応答曲面法の概要 ……*29*

2.3　要因配置実験と応答曲面法の比較のケーススタディ ……*37*

第 3 章　中心複合計画——*53*

3.1　中心複合計画とは ……*53*

3.2　中心複合計画における実験回数 ……*54*

3.3　中心複合計画の種類 ……*55*

3.4　中心複合計画のケーススタディ ……*63*

［参考 1］水準上下限の外側での実験が不可の場合 ……*66*

［参考 2］ボックス－ベーンケン計画 ……*66*

第 4 章　応答曲面解析——*73*

4.1　応答曲面解析の手順 ……*73*

無断使用をお断りします。日科技連出版社

4.2　滞空時間が最も長い条件の探索 ……75
手順1　データ入力 ……75
手順2　変数選択 ……78
手順3　モデルの妥当性確認 ……80
［参考］純誤差と当てはまりの悪さ ……82
手順4　残差の検討 ……83
手順5　モデルの確定および特性値に対する各因子の影響度の確認 ……85
手順6　最適条件の探索および予測 ……88
手順7　確認実験 ……90
4.3　目標の滞空時間を満たす条件の探索 ……91

第5章　多特性の最適化 ……105
5.1　2特性の同時最適化のケーススタディ ……105
5.2　望目，望小での2特性の最適化 ……117

第6章　D-最適計画 ……121
6.1　D-最適計画とは ……121
6.2　D-最適計画の活用 ……122
6.3　D-最適計画のケーススタディ1 ……125
6.4　D-最適計画のケーススタディ2 ……133
［参考］D-効率とは ……145

第7章　計画の拡張 ……151
7.1　計画の拡張とは ……151
7.2　計画の拡張のケーススタディ ……154
［参考］追加する実験回数の詳細 ……164

第8章　プラケット・バーマン計画 ……171
8.1　プラケット・バーマン計画とは(実験回数12回の場合) ……171

無断使用をお断りします。日科技連出版社

8.2　プラケット・バーマン計画のケーススタディ ……174

第9章　ロバスト性を考慮した最適化——181
9.1　ばらつきの考慮 ……181
9.2　ロバスト最適化とは ……183
9.3　ロバスト最適化のケーススタディ ……185

第10章　総合演習——ラジコンカーの最適化——197
10.1　因子の絞り込み ……197
10.2　燃費とラップタイムの同時最適化 ……199

付録　探索的な実験へのD-最適計画の適用——207

参考文献 ……213
索　　引 ……215

コラム一覧

コラム1　直交とは　19
コラム2　相関比とクラメールの連関係数　23
コラム3　実験因子の質的変数，量的変数での扱い　46
コラム4　主効果と交互作用の効果　49
コラム5　直交表の割り付け　68
コラム6　水準幅の設定　97
コラム7　モデルの予測精度に関する指標　100
コラム8　特性値の対数変換　101
コラム9　実験計画の素性の良さ　146
コラム10　ロバスト性の確保に向けた考え方　191
コラム11　シミュレーション実験　193

無断使用をお断りします。日科技連出版社

JUSE-StatWorks/V 5 総合編＆機械学習編 R 2 のご案内

■「JUSE-StatWorks/V 5 総合編＆機械学習編 R 2　トライアル版」「本書のサンプルデータ」ダウンロードのご案内

本書で使用しているパッケージ版のトライアル版(インストール後，30 日間利用可能)，およびそのなかで使用しているサンプルデータを下記の日本科学技術研修所の JUSE-StatWorks ウェブサイト(書籍用体験版・サンプルデータダウンロード)からダウンロードできます．

https : //www.i-juse.co.jp/statistics/support/pm/download.html

実際に JUSE-StatWorks を動かしながら，本書の解説や解析手法の出力結果をお読みいただくとさらなる学習効果が期待できます．また，ウェブサイトからは，JUSE-StatWorks の製品概要や活用事例，簡易手順，パッケージの購入方法，典型的な研修カリキュラム，研修内容なども入手できます．

■注意事項

(1)　JUSE-StatWorks/V 5 総合編＆機械学習編 R 2 の使用制限

① 体験版で扱えるデータは最大 30 変数×200 サンプルです．
　制限を超える大きなファイルを読み込んだ場合は，左から 30 変数，200 サンプルまでが読み込まれ，制限を超えた部分のデータは読み込まれませんのでご注意ください(なお，製品版は 1, 000 変数×100, 000 サンプルとなっています)．

② データの保存はできません．

(2)　その他

① 上記の方法でうまくいかない場合は，下記の日本科学技術研修所の JUSE-StatWorks ウェブサイト(お問い合わせ窓口)からご連絡ください．

https : //www.i-juse.co.jp/st/contact

② 著者および日本科学技術研修所，日科技連出版社のいずれも，ダウンロードデータを利用した際に生じた損害についての責任，サポート義務を負うものではありません．

③ 上記のサンプルデータは，著者に著作権があります．利用に当たっては，本書の購入者または購入者の所属する組織内でのみ使用を許諾します．許可なく外部へ公開することや営利目的での使用は禁止します．

無断使用をお断りします。日科技連出版社

2.2 応答曲面法の概要

日本国内では直交表を用いる実験が主流であった間に，海外では直交表にとらわれずに限られた実験回数という制約の下で，最も効率の良い実験を立案する方法が研究され，実用化されるようになった．近年は開発業務において，現象の複雑さから多因子多特性の事象を取り扱うことが多く，多特性を同時に最適化する際の精度も問われている．この場合，少ない実験で予測式を得ることができて多特性を同時最適化できる応答曲面法(response surface method)が有効であり，応答曲面法を活用することにより，先述の困りごと①～⑤の場面にも対応することができる．

具体的には，①の実験回数が多いことに対しては，応答曲面法の中心複合計画やD-最適計画(**第6章**で詳述するが，課題である事象を説明するモデルを与えられた実験回数，実験可能領域などで，最も精度よくモデルの項を推定できるよう構成された実験計画)では固有技術の情報を前提として，効率的な実験回数を実現することができる．②の手ごろな実験回数の直交表がないについては実験可能な回数に合わせた直交表を作成することができる(厳密には直交性を崩す場合もあるので直交表とはいえないときもある)．また，③の直交表への割り付けについては応答曲面法では必要ない．なお，後述するが，想定したモデルが間違っていた場合，見当違いの結果を出力する可能性もあり，モデルの技術的な裏付けが必要などの留意点がいくつかある．

次に④，⑤であるが，応答曲面法の解析手法である応答曲面解析(**第4章**)を用いれば，実験水準の中間値を考慮することも可能であり，かつ満足度関数(望ましさ関数)を用いた同時最適化も可能となる．これにより，④と⑤に対応できる．以下に，それぞれについて具体的に説明する．

(1) 従来の実験計画法と応答曲面法の計画と解析

①の応答曲面法では従来の実験計画法より実験回数を減らすことができるが，なぜ減らすことができるかを説明するために，それぞれの計画と解析を比較したものが**図表2.5**である．このように計画の種類，解析方法ともに両者には違いがある．

無断使用をお断りします。日科技連出版社

図表 2.5　従来の実験計画法と応答曲面法の比較

	従来の実験計画法	応答曲面法
計画の種類	要因配置実験 直交表実験 など	プラケット・バーマン計画 中心複合計画 D–最適計画 過飽和計画 一様計画 ボックス－ベーンケン計画 など
解析方法	分散分析	応答曲面解析
特徴	• 要因配置実験 実験回数が多くなる． • 直交表実験 割り付けを行う． • 主に国内で普及 • 計画，解析ともにわかりやすい．	• 高次の項(2次や1次×1次など)を考慮した重回帰分析 • 直交表にとらわれない効率的な実験 • 主に海外で普及 • 計画，解析ともにやや複雑

計画においては，従来の実験計画法が要因配置実験や直交表実験に対して，応答曲面法ではプラケット・バーマン(Plackett-Burman)計画，中心複合計画，D–最適計画となる．これらは，スクリーニングや最適値探索などの目的に応じて使い分けるが，いずれの計画も効率的にデータをとるための実験計画を提供することが特徴である．そのため，従来の要因配置実験や直交表実験と比較すると，実験回数も少ない傾向にある．参考までに各計画における実験回数を**図表 2.6** に示す．

例えば，3水準系で5因子の場合($k=5$)，要因配置実験では243回，直交表実験では(割り付けにもよるが)81回という実験回数に対して，応答曲面法の中心複合計画では29回と大幅に少ない実験回数を実現できることがわかる．また，後述するD–最適計画ではさらに実験回数が少ない21回となる(ただし，**第6章**で詳細を述べるが使用上の注意点も多い)．4因子($k=4$)の場合でも要因配置実験が81回，直交表実験では27回に対して，応答曲面法の中心複合計画では27回，D–最適計画では15回となっている．なお，直交表実験と中心複合計画は同じ27回ではあるが，後者のほうが効果を確認できる項の数が多い

無断使用をお断りします。日科技連出版社

図表 2.6 実験回数の比較

実験方法＼因子数：k	2 水準系		3 水準系		
	$k=10$	$k=12$	$k=3$	$k=4$	$k=5$
要因配置実験	$2^{10}=1024$	$2^{12}=4096$	$3^3=27$	$3^4=81$	$3^5=243$
直交表実験※1	$L_{16}=16$	$L_{32}=32$	$L_9=9$	$L_{27}=27$	$L_{81}=81$
応答曲面法	〈プラケット・バーマン計画〉		《中心複合計画》※2		
	12	20	17	27	29
			《D−最適計画》※3		
			10	15	21
	主効果のみの検討		2 次主効果＋すべての交互作用含む		

※1：因子の割り付けにより，選択される直交表が異なる．
※2：中心の繰り返し 3 回
※3：技術的知見がある場合．JUSE-StatWorks では仕様上＋1 回となる（$k=3$ なら 11 回）．

などメリットも多い．

（2） 応答曲面法の実験回数が少ない理由

なぜ応答曲面法では少ない実験回数となるのか．その理由は両者で「実験で確認できる要因効果の数」が異なるからである．詳細な説明をするために，まず要因配置実験で確認できる効果を見ていく．3 水準系，因子数が 4 の場合で見ていくと，要因配置実験では 3^4 で 81 回の実験を実施することになる．この 81 回の実験で特性値への影響を評価できる要因効果の一部を表したものが**図表 2.7** である．要因 a，b などの「1 次の効果」，要因 a^2 や $a\times b$ などの「2 次の効果」，要因 $a^2\times b$ や $a\times b\times c$ などの「3 次の効果」，要因 $a^2\times b^2$ や $a^2\times c^2$ といった「4 次の効果」など実に多くの項を確認できる．要因配置実験では「実験数−1」の数だけ要因効果を確認できるため，ここでは実に 80 個，次数にして「8 次の効果」までを確認することができる（**コラム 3** 参照）．つまり，それだけ多くの要因を評価するために，実験回数が多くなっているともいえる．

なお，ここでの要因効果である 1 次，2 次，…は，因子を連続量，つまり「量的因子」としてとらえているが，**第 1 章**で述べた要因配置実験と直交表実験で

無断使用をお断りします。日科技連出版社

間を表す).

■最適化グラフの技術的な考察

この最適化グラフにおいても，各因子の特性に対する影響を技術的に納得できるか考察するのがよい．例えば，翼角度は２次項まで取り込まれているが，それが技術的に妥当なのか，もし２次では説明できないのであれば，２次項をあえて変数選択から削除し１次項のみで検討するなどである．ここでは，固有技術で考察しても妥当なグラフ形状であると判断し，次の最適化のステップに進む．

手順６　最適条件の探索および予測

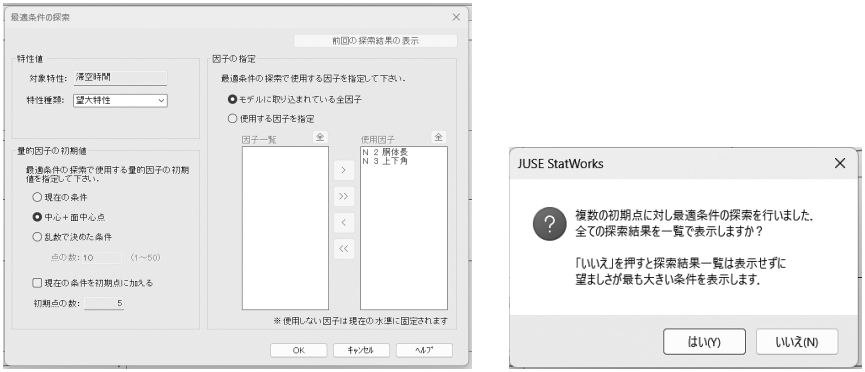
最適化グラフでは，胴体長，翼角度ともに，水準値が大きいほど滞空時間が長くなることがわかる．このケーススタディの場合は，シンプルな特性値グラフのため，手動にて胴体長や翼角度の値を大きくしてもよい．しかし，特性が複数ある場合(多特性)や交互作用項が強く影響している場合には，手動では難しい場面もある．そこで，ここではJUSE-StatWorksの機能を使って最適化を実施する方法を説明する．

■最適化の操作

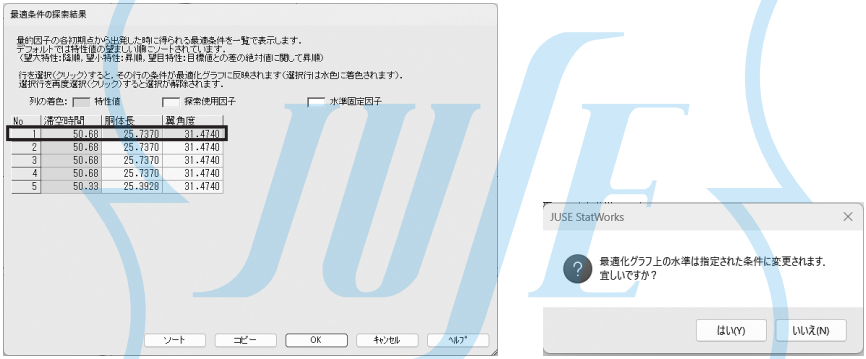
メニューバーにある［最適化(自動)］をクリックすると**図表 4.17 左**の最適条件の探索画面が表示されるため，［特性種類］を「望大特性」と指定し，［量的因子の初期値］はデフォルトの「中心＋面中心点」，［因子の指定］もデフォルトの「モデルに取り込まれている全因子」のままで［OK］をクリックする．**図表 4.17 右**の画面が出たら，そのまま［はい］をクリックする．なお，望大特性は大きい(長い)ほど良い特性を意味し，このケーススタディでは滞空時間が長いほど良いため，望大特性となる．

すると，**図表 4.18** の最適条件の探索結果の画面となる．罫線で囲んだNo. 1の行(出力画面では水色)が滞空時間が最大値をとる条件であるが，今回の場合No. 1～4のいずれも滞空時間50.68であり，胴体長25.737，翼角度31.474が最適条件となっている．ここで，［OK］をクリックすることで最適化グラ

無断使用をお断りします。日科技連出版社



図表 4.17　最適条件の探索画面(左)と探索結果表示のダイアグラム(右)



図表 4.18　最適条件の探索結果(左)と最適条件に変更するダイアログ(右)

フにその水準を反映するかのメッセージ(**図表 4.18 右**)が出るので［はい］をクリックする.

図表 4.19 のように，胴体長，翼角度ともに先の水準に変更され，滞空時間も 50.68 となることを確認できる.

■最適条件の探索方法

この最適条件の探索であるが，ダウンヒル・シンプレックス法を使用している．詳細は割愛するが，シンプレックスと呼ばれる図形を細かくジグザクに動かしながら最も高い方向へ山登りする，もしくは最も低い谷底に向かって下りながら(ダウンヒル)最適解を探索する方法である.

無断使用をお断りします。日科技連出版社

索　引

［英数字］

2 次多項式モデル　*34, 53*
2 次モデル　*34, 53*
2 水準系　*4, 5, 26*
2 特性の最適化　*117*
3 水準系　*4, 5, 26*
Adaptive Elastic Net　*208*
Adaptive LASSO　*208, 209*
CN 値　*147*
D−効率　*145*
D−最適計画　*29, 30, 121, 122, 124, 207*
　——の特徴　*121*
　——の留意点　*123*
JUSE-StatWorks（ソフトの説明）　*xii*
JUSE-StatWorks（の操作）　*8, 13, 20, 37, 63, 75, 91, 106, 125, 134, 154, 175, 185, 197, 208*
L_8 直交表　*12*
LOF　*81, 151*
P 値　*82*
R^{*2}　*80*
R^2　*80*

［あ　行］

当てはまりの悪さ　*81, 82, 151*
一因子実験の繰返し　*2, 25*
因子　*5*
応答曲面解析の手順　*73, 74*
応答曲面解析の最適化　*41, 43*
応答曲面法　*6, 29*
　——の解析　*34*
　——のメリット　*36*
　——の留意点　*35*

［か　行］

外挿　*95*
　——での最適化　*95*
外乱　*181*
確認実験　*18, 90, 132, 145, 161*
角の実験点　*54*
頑健性　*181*
基本機能　*191*
寄与率　*8, 80, 100*
クラメールの連関係数　*23, 24*
計画の拡張　*152*
系統誤差　*7*
ケーススタディ
　2 特性の同時最適化の——　*105*
　D−最適計画の——　*125, 133*
　応答曲面解析の——　*73*
　計画の拡張の——　*154*
　中心複合計画の——　*63*
　直交表実験の——　*11*
　二元配置実験の——　*7*
　プラケット・バーマン計画の——　*174*
　要因配置実験と応答曲面法の比較の——　*37*
現場で聞く困りごと　*26*
交互作用　*2, 5*
　——の効果　*49*
誤差因子　*4*
固有技術の観点でのモデルの検討　*86*

［さ　行］

最適化手順　*188*
最適条件の探索　*39, 88, 110, 141, 158,*

無断使用をお断りします。日科技連出版社

202
——方法　89
最適値探索　30
残差の検討　83, 110
シード値　126, 155
軸点　54
実験因子　46
実験回数と実験空間　56
実験回数の比較　31
実験計画の素性の良さ　146
実験計画法　1
——でできること　3
——の手順　3
実験点の比較　33
質的変数　23, 46
シミュレーション実験　193
自由度調整済み寄与率　80, 100
自由度二重調整数済み寄与率　100
主効果　5, 49
純誤差　54, 82, 193
水準　5
——幅の設定　97
スクリーニング　30, 174
——計画　153
正規確率プロット　84
正規性の検定　84
制御因子　4
正則化回帰　208
摂動点　183
摂動幅　183
相関係数　23, 58
相関比　23

［た　行］

対数変換　101
ダウンヒル・シンプレックス法　89
多重共線性　76, 148
中心化　76
中心点　54
中心複合計画　29, 30, 33, 53, 68, 124
——の実験回数　54
——の種類　55, 57
直交　19
直交計画　56
——の直交性　57
直交性の良し悪しの目安　58
直交表　26
——実験　6, 11, 25, 26, 30
——の割り付け　68
統計的に有意な因子　16
特性値　5
——変動　183

［な　行］

内挿　95
二元配置実験　7
望ましさ D　113
望ましさ関数　29, 115

［は　行］

パラメータ設計　183
標示因子　4
プーリング　9, 16
プラケット・バーマン計画　30, 171, 176
——の留意点　172
ブロック因子　4
分解能　69
分散分析　8
——表　8
変数減少法　79
変数減増法　79
変数選択　78, 100, 106, 186
——の留意点　79, 178

無断使用をお断りします。日科技連出版社

変数増加法　79
変数増減法　79
望小特性　91
望目特性　91
　――による最適化　93
ボックス–ベーンケン計画　66, 68

［ま　行］

マルチコ　76
満足度関数　29
面中心計画　57
　――の直交性　59
モデルの確定　85
モデルの誤差　81
モデルの予測精度　100
モデルの妥当性確認　80, 109, 127, 139, 156

［や　行］

要因配置実験　6, 25, 26, 30, 33, 37

［ら　行］

リッジ回帰　208
量的変数　23, 46
レゾリューション　69
ロバスト最適化　183
ロバスト性　181
　――の確保　191

無断使用をお断りします。日科技連出版社

●著者紹介

渡邉 克彦(わたなべ かつひこ)

東京理科大学基礎工学研究科修士課程修了．トヨタ自動車㈱に入社．第3電子技術部への配属を経て，TQM 推進部，SQC グループのグループ長として応答曲面法，信頼性，品質工学，感性評価などの社内講座における質向上の取組みを行う．現在は，SQC および機械学習におけるデータ分析の普及推進や実践活用の支援に従事．

社内およびトヨタグループのデータ分析推進・指導アドバイザ．日本規格協会講師，中部品質管理協会講師．

[著書]

『開発・設計に必要な統計的品質管理』(共著，日本規格協会，2015 年)．2016 年度日経品質管理文献賞受賞．

『上手な機械学習と統計的品質管理の使い方入門』(日科技連出版社，2021 年)．2021 年度日経品質管理文献賞受賞．

佐々木 成実(ささき なるみ)

九州大学工学部機械工学科卒業．トヨタ自動車㈱に入社．電子部品の工程開発や生産準備に従事しつつ，応答曲面法社内講座を立ち上げ，解析方法の改善を図る．現在は，TQM 推進部にて，社内 SQC 講座や社外シンポジウムの企画・運営に従事．

無断使用をお断りします。日科技連出版社

応答曲面法の実践活用

JUSE-StatWorks による実験計画の作成と解析のテクニック

2026 年 10 月 31 日　第 1 刷発行

著　者　渡邉克彦
　　佐々木成実
発行人　戸羽節文

検印省略

発行所　株式会社 日科技連出版社
〒 166-0003　東京都杉並区高円寺南1-2-1
日本科学技術連盟　東高円寺ビル
電話　03-6457-7875

Printed in Japan

印刷・製本　港北メディアサービス

© *Katsuhiko Watanabe, Narumi Sasaki 2026*
ISBN 978-4-8171-9823-5
URL https://www.juse-p.co.jp/

本書の全部または一部を無断でコピー，スキャン，デジタル化などの複製をすることは著作権法上での例外を除き禁じられています．本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは，たとえ個人や家庭内での利用でも著作権法違反です．