

無断使用をお断りします。日科技連出版社

Excelによる 実験計画法

すぐに実務に活かせる智慧と工夫

松本哲夫 [編著]

植田敦子・平野智也・山来寧志 [著]



日科技連

まえがき

実験計画法を知っているか否かで、工程改善や研究開発の速度には雲泥の差が生じる。「新幹線と駕籠ぐら^{かこ}いの差がある」との言葉もある。継続的に改善や研究開発を進めていくうえで極めて有用な方法であるにもかかわらず、現場と手法とのインターフェースをとること、すなわち、固有技術的な問題に合わせて適切な実験計画法の手法を選択することが容易でなく、加えて複雑な計算をしなければ解析できないことが面倒というもあって、実験計画法を積極的に活用しようとする人が一部に限定されていた。

実験計画法自体は方法論であるが、数理統計学にその基礎を置き、理論が難解であるという側面がある。統計的方法の中でも、実験計画法と多変量解析法がその難しさにおいて双璧と感じている研究者、技術者が多いようである。

R. A. Fisher に始まった実験計画法は、農作物の増収や品種改良、工業製品の品質や収量の向上、生産効率の改善や新製品の開発などに成果をあげてきた。最近、実験計画法が脚光を浴びるケースは減ってきているようにも見えるが、解決すべき問題はむしろ増えている。今後も、業種や専門分野を問わず、実験計画法が実用的な方法論として重要な役割を果たしていくであろうことは間違いない。

実験結果の解析や解釈が大切である一方、所望の結果を得るための実験の計画がより重要である。実験は、目的、すなわち、生じた問題を解決するために行い、消費者社会、企業組織、また、実験者自身に対して、現状よりもよい結果を期待する。その分野の専門家である実験者は実験結果を予測し得るが、思い込みが強すぎると、結果を客観的に評価できないおそれがある。実験計画法は実験者に統計的な判断基準・客観的な判断材料を提供してくれる。

企業における開発活動や改善活動に実験計画法を適用しようとする目的には、次のようなことが例示される。

- ① 品質特性をさらによくする条件(最適条件)の探索、決定

- ② 誤差の大きさの定量的な評価
- ③ 品質に影響する可能性のある諸要因の中からの有意な因子の抽出
- ④ 要因効果の検定とその大きさの推定
- ⑤ 特性値の母平均の推定、将来的に得られる品質特性値の予測
- ⑥ 製品の不良とその原因間の因果関係の定量的把握
- ⑦ 経験的、あるいは、理論的に想定されるモデルの検証

本書は、実験計画法の中でも直交表実験の実務への適用(計画と解析・解釈)の解説に主眼を置いている。第1章から第5章では実験の計画に重点を置いた説明をするが、理論には深く立ち入らず、直観的に実験計画法を修得できるように配慮した。計算は手持ちのパソコンソフト(Microsoft Excel: 以下、単にExcelと呼ぶ)で簡単に実施できるよう、第6章・第7章では、そのための解析ソフトの使用法と、計算結果(出力)の解釈の仕方について解説する。

こういったねらいから、まず、第1章では実験計画法とその生い立ちを述べる。第2章では基礎となる統計的な考え方を示すとともに、第3章以降で展開する実験計画法のもとなる数理統計について最小限の説明をする。実験を計画し、得られたデータを解析する方法としては、第3章の検定と推定から始め、第4章の1元配置実験、2元配置実験などの要因配置実験、そして、その延長線上に第5章の直交表実験を理解できるようにした。

第6章では、幅広い場面で使用できる実務にすぐに役立つ解析ソフト、すなわち、Excelにアドインされているデータ分析(分析ツール)を活用して、汎用的な手順で第2章～第4章のデータ解析を定型的に行う方法を紹介し、例題を通してその利用法を解説した。第7章では、直交表実験の分散分析と母平均の推定を簡単に実施できるExcelソフトを用意し、その利用法を解説する。本書の各章には以上のような関連性をもたせて構成してある。

また、本書の特徴として、現場と手法とのインターフェースをとれるよう、「実務に活かせる智慧と工夫」を随所に盛り込み、実務に即した説明を加えた。併せて、直交計画についての若干の補遺と、欠測値に対する実務的な対処法について、巻末の付録に記載した。

手法の使い方だけでなく、ある程度の理論面(数式)の習得を目指している読者は、松本哲夫ら著『実務に使える実験計画法』(日科技連出版社、2012年)などで学んでいただきたい。

本書は、研究者、技術者をはじめとして、工程管理、品質管理、品質保証、マーケティングなど「ものづくり」に携わる実務家に、実際の現場で役立ててもらうことを目的として執筆した。基本的な手法を平易に記述しているので、初めて実験計画法を学ぼうとするときの入門書としても活用できる。また、一般財団法人日本科学技術連盟が主催する「2日でマスターする実験計画法セミナー」のテキストとしても使用できるようになっている。

本書の内容については、上記の『実務に使える実験計画法』と、「2日でマスターする実験計画法セミナー」の前テキストである花田憲三著『実務にすぐ役立つ実践的実験計画法 super DOE 分析』(日科技連出版社、2004年)にルーツを置く。本書は4名の共著によるが、上記セミナーの講師の長年にわたる経験の蓄積が内容に結集されており、著者らを常にご指導ご鞭撻いただいた講師諸氏、一般財団法人日本科学技術連盟大阪事務所の前田兼利氏、陣出真氏、ならびに、日科技連出版社の鈴木兄宏氏、石田新氏に深く感謝する。

2022年11月

編著者 松本哲夫

目 次

まえがき *iii*

第1章 実験計画法とその生い立ち	1
1.1 実験計画法(Design of Experiments)とは	1
1.2 数理統計学との関連	3
1.3 特性値に影響する要因	3
1.4 計量値と計数値	6
1.5 p 値について	7
1.6 補遺	8
第2章 基礎となる考え方	11
2.1 統計的な考え方と確率分布	11
2.2 正規母集団に関する推測	18
2.3 2つの母分散の比の分布	24
2.4 補遺	26
第3章 検定と推定	31
3.1 統計的推測とは	31
3.2 1つの母集団に関する推測	31
3.3 2つの母集団の比較に関する推測	42
3.4 同等であるといいたいとき	53
3.5 正規母集団に関する推測のまとめ	55

第4章 要因配置実験	57
4.1 1元配置実験	57
4.2 2元配置実験	69
4.3 多元配置実験	81
4.4 補遺	82
第5章 直交表による実験	85
5.1 直交表の導入と考え方	85
5.2 2^n 型要因配置実験	87
5.3 $L_4(2^3)$ 型直交表	92
5.4 2水準系直交表の性質と種類	93
5.5 2水準系直交表の割付け方法	95
5.6 多水準法(擬水準法の紹介を含む)	108
5.7 Resolution IVの割付け	117
5.8 補遺	124
第6章 Excel分析ツールの使い方	129
6.1 Excelによる計算方法	129
6.2 分析ツールの活用	129
6.3 Excelの組込み関数と行列関数の使い方	130
6.4 第2章～第4章の例題の計算	131
6.5 Excelの分析ツールを使用するときの注意事項	142
第7章 Yates, 逆Yatesの計算と Excelソフト「直交表の解析」	145
7.1 Yatesの計算方法	145
7.2 逆Yatesの計算方法	147
7.3 Excelソフト「直交表の解析.xlsm」の利用法	148

7.4	第5章の例題の計算	154
7.5	「直交表の解析.xlsx」の使用上の注意	163
7.6	3水準系の直交表に関する斎藤の計算	163
付録		165
付録A	直交計画の優位性	165
付録B	直交と独立の概念の異同	166
付録C	欠測値への対応	167
付表		173
参考文献		181
索引		183

[実務に活かせる智慧と工夫]

変量因子が関係する交互作用	6	等分散性の確認	64
実験計画の効率	8	プーリングの目安	74
区間推定について	9	プーリングについて	74
繰返し実験と反復実験の得失	9	多元配置実験と直交表実験	81
「信頼率95%の信頼区間」の意味	21	グラフで見る交互作用の現れ方	82
中心極限定理, 大数の法則, 正規分布	26	プーリングの目的	83
平方和, 平均平方	27	線点図の利用	102
自由度	28	L_{16} 直交表での多水準因子の割付け	110
最良線形不偏推定量(BLUE)	38	擬水準法の適用について	116
データに対応があるということ	52	誤差列が存在しないときの対処	117
同等であるといいたいとき	53	L_{16} 直交表としての割付け(参考)	121
ランダムイズの重要性	60		

L_{16} 直交表における Resolution IV の割付け 123	推定値と実測値の比較 127
2水準系で3水準を実現するもう1つの方法 126	一部実施ということ 128
3水準とする意味 127	標準誤差と標準偏差 143
	意図的な欠測値 171

★解析ソフト・補遺のダウンロード方法

本書で使用している解析ソフト、ならびに、補遺は、日科技連出版社の Web サイト (<https://www.juse-p.co.jp/>) からダウンロードできます。ダウンロードしたファイルと本書を併用することで、Yates、逆 Yates の計算方法を用いた直交表の解析について理解が深まり、実務に応用しやすくなります。

ID : juse-doe

パスワード : XXXXXXXXXX

★パソコンの環境

本書では、Windows 版 Excel がインストールされているパソコンを対象としています。Excel のバージョンについて、現時点で、2013、2016、2019、2021、Microsoft 365 での動作を確認していますが、任意の環境で動作することを保証していません。なお、Microsoft 365 については、バージョンによって、ドキュメントが「信頼済み」であることを要求されることがあります。

★免責事項

著者、および、出版社のいずれも、Excel の解析ソフトを利用した際に生じた損害についての責任、ならびに、サポート義務を負うものではありません。

表 4.7 分散分析表

<i>sv</i>	<i>ss</i>	<i>df</i>	<i>ms</i>	F_0	$E(ms)$	F_0
A	52	2	26	11.14*	$\sigma^2 + 8\sigma_A^2$	14.18*
B	21	3	7	3.00	$\sigma^2 + 6\sigma_B^2$	3.82*
A × B	5	6	0.8333	0.36	$\sigma^2 + 2\sigma_{A \times B}^2$	
e	28	12	2.3333		σ^2	
e	33	18	1.8333		σ^2	
計	106	23				

[手順 5] 分散分析表の作成

分散分析の結果、主効果 A は有意となったが、主効果 B と交互作用 A × B は有意ではない(表 4.7)。

[手順 6] 誤差項へのプーリング

交互作用が有意でない場合、誤差へのプーリングを行うことがある。

[実務に活かせる智慧と工夫] プーリングの目安

以下がプーリングする際の目安である。

- ① 「 F_0 値が 2 以下」ならプールする
- ② 「有意水準 25% 程度で有意でない」ならプールする
- ③ 実務では、固有技術的な観点からも検討する

表 4.7 の分散分析表のように、本書では、新しく求めた誤差項での結果を含め、プーリング前後の結果を合体した 1 つの表で表示する。上向き矢印は検定方式を、下向き矢印はプーリングを、それぞれ示す。

[実務に活かせる智慧と工夫] プーリングについて

実務では、要因の最適水準を検討するという要因配置実験のねらいに即して、関連する交互作用が有意か否かに関わらず、主効果が有意でなかっ

た場合でも通常はプーリングを行わない。一方、要因効果の有無を検討する第5章の直交表実験では、そのねらいに即して、関連する交互作用も主効果も有意でないとき、交互作用だけでなく、主効果をプールすることもある。

交互作用を無視することは、 $\sigma_{A \times B}^2 = 0$ とみなすことであり、 $A \times B$ の平方和を誤差項の平方和へプーリングし、新たな誤差項 V'_e を、

$$V'_e = (S_{A \times B} + S_e) / \phi'_e, \quad \phi'_e = \phi_{A \times B} + \phi_e \quad (4.2.11)$$

から求め直す。[例題 4.3] で $A \times B$ を無視することになると、 $V'_e = (5+28)/(6+12) = 1.8333$ となる。プーリング後の分散分析の結果を、表 4.7 では、網掛け部分で示してある。因子 B は、プーリング後では有意になった。分散分析後のデータの構造は、分散分析前の $y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk}$ から交互作用項を除き、 $y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ijk}$ とする。

4.2.4 分散分析後の解析

分散分析後に行う母平均や母平均の差の推定では、交互作用効果は無視するかしないかによって、以下に示すように解析法が異なる。この理由は、線形の不偏推定量としては何通りかが考えられる中で、それがもつ分散の最も小さい最良のものを使用するためである⁵⁾。また、誤差分散も、分散分析の結果から無視しない因子だけをデータの構造に残し、その構造のもとで推定する。

[1] 繰返しのある2元配置実験で、交互作用を無視しないときの処理母平均の推定

① 点推定

交互作用効果は無視しないとき、データの構造は変化しない。したがって、2因子の水準組合せ $A_i B_j$ のもとでの母平均 $\mu(A_i B_j) = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij}$ の点推定は、式(4.2.12)となる。

5) 3.2.3項で述べたBLUEの考え方である。

第6章

Excel 分析ツールの使い方

6.1 Excel による計算方法

第2章～第4章で述べてきた計算は Excel のデータ分析ツールを用いて行うことができる。

6.2 分析ツールの活用

計算の基本手順を以下に示す。

[手順1] Excel を起動する。

[手順2]* リボンのタブの「データ」をクリックする。

[手順3] 一番右にある「データ分析」をクリックする。「データ分析」が表示されない場合は次の囲みの手順でアドインを追加する。

[手順4] 分析ツールのメニューウィンドウが開くので、必要なものを選択する。

[手順5] ウィンドウの指示に従って入力し、計算する。

[アドインの追加手順]

[手順1] リボンの「ファイル」をクリックする。

[手順2] オプションをクリックする。

[手順3] アドインをクリックする。

[手順4] 左下の管理の所が「Excel アドイン」となっていることを確認する。

そうならないときは、下向き矢印をクリックして、選択肢の中から

「Excel アドイン」を選ぶ。

[手順5] 設定をクリックすると、アドインのウィンドウが開く。

[手順6] 「分析ツール」と「分析ツール-VBA」にチェックを入れ、OK をクリックする。

[手順7] 6.2項の[手順2]*に戻る。

6.3 Excel の組込み関数と行列関数の使い方

知っておくと便利な Excel の組込み関数をいくつか示しておく。

[手順1] Excel を起動する。

[手順2] 次の書式で関数名とその引数をセルに入力する。

- ① 配列の積和計算 → =SUMPRODUCT (配列1の範囲, 配列2の範囲)
- ② データの規準化 → =STANDARDIZE (データ範囲, 平均値, 標準偏差)
- ③ 2つの行列・ベクトルの積の計算 → =MMULT (左からかける行列のセル範囲, 右からかける行列のセル範囲)
- ④ 転置行列の計算 → =TRANSPOSE (転置したい行列のセル範囲)
- ⑤ 逆行列の計算 → =MINVERSE (逆行列を求める行列のセル範囲)

[手順3] 手順2の③～⑤は行列関数で、その実行手順は以下のようにする。
なお、①、②では、その必要がない。

- ① 計算結果を入れるエリアの左上のセルに移動する。
- ② そのセルからドラッグして、計算結果を表示するエリアを選択、網掛けする。
- ③ そのまま左上のセルに実施する③～⑤の組込み関数を手順2の形で入力する。
- ④ F2 キーを1回単押しする。
- ⑤ Shift と Ctrl の両キーを同時に押しながら Enter キーを押す。
- ⑥ 計算結果が表示される。

表 6.1 計算結果 ([例題 2.1])

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	97		列1					
2	100							
3	131		平均	100				
4	110		標準誤差	5.9884				
5	69		中央値 (メジアン)	97				
6	95		最頻値 (モード)	#N/A				
7	89		標準偏差	17.9652				
8	118		分散	322.75				
9	91		尖度	0.53				
10			歪度	0.13				
11			範囲	62				
12			最小	69				
13			最大	131				
14			合計	900				
15			データの個数	9				
16			信頼度 (95.0%)	13.809				

[DIY]

S= 2582

母分散の信頼下限= 147.25

母分散の信頼上限= 1184.55

母平均の信頼下限= 86.2

母平均の信頼上限= 113.8

基本統計量 ? X

入力元

入力範囲(I)

データ方向: 列(C) 行(B)

先頭行をラベルとして使用(L)

出力オプション

出力先(Q):

新規ワークシート(P):

新規ブック(W)

統計情報(S)

平均の信頼区間の出力(N) %

K 番目に大きな値(A):

K 番目に小さな値(M):

図 6.1 基本統計量の入力画面 ([例題 2.1])

●編著者紹介

松本 哲夫(まつもと てつお)

[経歴]

1973年 大阪大学基礎工学部化学工学科卒業
1975年 大阪大学大学院基礎工学研究科化学系修士課程修了
1975年 ユニチカ株式会社入社
1986年 技術士(経営工学部門)
1996年～ フィルム製造部長, 工業フィルム営業部長, 樹脂生産開発部長
2007年～ 技術開発企画室長, 執行役員中央研究所長, 執行役員技術開発本部長
2013年～ 顧問(現職)
一般財団法人日本科学技術連盟 講師
株式会社日本人財研究所 講師

[受賞歴]

2011年 文部科学大臣表彰 科学技術賞開発部門
2012年 公益社団法人高分子学会 フェロー表彰
2015年 一般社団法人日本品質管理学会 品質管理推進功労賞
2020年 一般社団法人日本品質管理学会 品質技術賞 他

[著作]

『応用実験計画法』(日科技連出版社, 共著, 1995年), 『実用実験計画法』(共立出版, 共著, 2005年), 『実務に使える実験計画法』(日科技連出版社, 共著, 2012年), 『実験計画法100問100答』(日科技連出版社, 共著, 2013年), 『Excelによる多変量解析』(日科技連出版社, 共著, 2021年) 他

●著者紹介

植田 敦子(うえだ あつこ)

[経歴]

1985年 名古屋大学理学部化学科卒業
1985年 ユニチカ株式会社入社
2014年 フィルム事業部 フィルムカスタマーソリューション部長
2022年～ 執行役員, 中央研究所長
一般財団法人日本科学技術連盟 講師

[著作]

『実務に使える実験計画法』(日科技連出版社, 共著, 2012年), 『実験計画法100問100答』(日科技連出版社, 共著, 2013年)

平野 智也(ひらの ともや)

[経歴]

- 1997年 名城大学理工学部機械工学科卒業
1999年 名城大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了
1999年 ダイキン工業株式会社入社
2014年 特機事業部 環境医療機器部 商品戦略担当課長
2022年～ 特機事業部長

[著作]

『実務に使える実験計画法』(日科技連出版社, 共著, 2012年), 『実験計画法 100問 100答』(日科技連出版社, 共著, 2013年) 他

山来 寧志(やまらい やすし)

[経歴]

- 1996年 大阪電気通信大学工学部経営工学科卒業
1998年 大阪電気通信大学大学院工学研究科修士課程修了
1998年 大阪電気通信大学研究員
2004年～ 大阪電気通信大学 講師
一般財団法人日本科学技術連盟 講師
一般財団法人日本規格協会 講師

[著作]

『フリーソフトウェア R による統計的品質管理入門』(日科技連出版社, 共著, 2005年), 『新 QC 七つ道具活用術』(日科技連出版社, 共著, 2015年), 『品質管理に役立つ統計的手法入門』(日科技連出版社, 共著, 2021年)

無断使用をお断りします。日科技連出版社

Excel による実験計画法
すぐに実務に活かせる智慧と工夫

2022年12月28日 第1刷発行

編著者 松本哲夫
著者 植田敦子
平野智也
山来寧志
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
〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷5-15-5
DSビル
電話 出版 03-5379-1244
営業 03-5379-1238

Printed in Japan

印刷・製本 港北メディアサービス

© Tetsuo Matsumoto, et al. 2022

ISBN 978-4-8171-9767-2

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。