

2018. 8. 15

工程改善実験法 今昔

技術士(経営工学) 末浪憲一

はじめに

半世紀も前のことである。当時、関西地区家電メーカーの部品事業部に所属して固定抵抗器の端子接続法の工夫をしていた。円筒状本体の両端にリード線を取り付けることである。抵抗器の本体にリード線を銀鑢付けをした端子を圧着していたが、コストと生産性の点から、スポット溶接機の導入が進められていた。リード線の先端部を抵抗器の電極(軟鉄製)に押しつけておいて大電流を流して、圧着部でジュール熱を発生させて圧着部を溶接接続する方法である。ジュール熱を安定化するためにコンデンサの静電容量、充電時間と充電電圧、放電回路抵抗、抵抗器の端子に圧着するリード線の長さ、圧力などの要因を特性要因図で整理して、順番に実験した。どの要因も非常に重要であるとの実験結果を入手したので、それらの要因を最適な条件にして確認実験した。ところが結果は、予想通りではなかった。今反省すると、それら要因間のトレードオフ(交互作用)を考えていなかった。最大の原因は、多因子を組合わせた場合の確認実験をしていなかったことである。フィッシャーの3原則の一つである「局所管理」に従わない実験であった。局所管理の基本的な考え方は、均一な実験の場で比較したい複数の処理を比較し評価する技法である。3原則の残り2つは、無作為化、反復である。

当時の実験計画法は、完備型実験計画法(2元配置や3元配置)であったが、取り上げる因子の数を増やすと実験回数が多くなる。しかし、それらの実験結果から得られる高次の交互作用効果や、固有技術面の検討によって存在しないとわかっている交互作用を無視すれば、完備型実験計画のように全ての実験をしないで、一部分だけの実験(一部実施法)で済ますことができる。これには直交表を用いた実験(直交実験)が有効であったと後で知った。

直交表

直交表には2水準系と3水準系がある。第1表は、2水準系の割り付け表($L_8(2^7)$)である。7列8行で、上段の7列には、互いに独立した6個の要因を割り付けることができる。7列の内1列には、6個の要因の有意性の確認のために割り付けできない。8行は実験番号である。列番号と行番号(実験番号)の交点は、実験を行うときの要因Lの水準である。実験番号1は、全ての6個の要因が水準1を組合わせた場合の実験値で、その値はX1である。

任意の2列について考えると、水準1と2の組合わせ(1,1)、(1,2)、(2,1)、(2,2)は同じ回数である。また、ある列(例として1列)の偏差平方和を求める場合、同じ水準(1)を考えたとき、他の列では水準1と水準2が同数割り付けられている。そして、この要因の効果の和は0であるから、この列(1列)の偏差平方和には、他の列の要因の影響は入らない。1列の偏差平方和の和は、水準1のデータの和 $X(1) = x_1+x_2+x_3+x_4$ 、水準2のデータの和 $X(2) = x_5+x_6+x_7+x_8$ であるから、1列の平方和は、 $\{X(1) - X(2)\}^2 / 8$ で求めるこ

とができる。分母の 8 は、データ数である。他の列についても同様にして求めることができる。これらの計算結果を用いて、分散分析表を通常の方法で作成できる。

表の成分は、要因を割り付けるとき、利用することができる。1 列（成分 a）に要因 A、2 列（成分 b）に要因 B を割り付けたとき、3 列の成分は (ab) であるから、要因 A と要因 B の交互作用効果が 3 列に出てくる。

(第 1 表)


		列 番 号							デ ー タ
		1	2	3	4	5	6	7	x
実 験 番 号	1	1	1	1	1	1	1	1	x 1
	2	1	1	1	2	2	2	2	x 2
	3	1	2	2	1	1	2	2	x 3
	4	1	2	2	2	2	1	1	x 4
	5	2	1	2	1	2	1	2	x 5
	6	2	1	2	2	1	2	1	x 6
	7	2	2	1	1	2	2	1	x 7
	8	2	2	1	2	1	1	2	x 8
成 分	a	b	ab	c	ac	bc	abc		

直交表で得たデータを「R」で解析するために、(第 2 表) のように修正しなければならない。

(第 2 表)

列番		1	2	3	4	5	6	7	°C
実 験 番 号		A	B	AxB	C	AxC	e	D	X
	1	1	1	1	1	1	1	1	28.3
	2	1	1	1	2	2	2	2	29.9
	3	1	2	2	1	1	2	2	30.4
	4	1	2	2	2	2	1	1	38.2
	5	2	1	2	1	2	1	2	38.9
	6	2	1	2	2	1	2	1	41.6
	7	2	2	1	1	2	2	1	43.8
	8	2	2	1	2	1	1	2	61.3

第 1 表の実験計画で得た割り付けデータ表をエクセル上で開き第 2 表のように修正する。

水準を示す記号「1」や「2」の前に「L」の小文字「1」をつける。列番の下の方に要因の記号を入れる。解析に必要なデータは  で囲んだ部分である。この部分をコピーして、クリックボードに入れておく。

「R」について

「R」はニュージーランドの Auckland 大学の講師 Ross Ihaka と Robert Gentleman が開発した統計計算とグラフィックスのソフトウェアである。R は、フリーソフトウェアなので誰でも無償で使用できる。「R」は、開発された「Rcmdr」を用いて、殆どの統計データ処理が可能のため普及にはめざましいものがある。大学や高专等の学生達は、計算センターのコンピュータを使用せず、家庭にあるパソコンを用いて種々の演習問題の報告書を作成している。また、書店に行くたびに「Rによる○○」の書籍が増えている。

インターネットでは、「計算ソフト R」で、インストール法や詳細な説明が成されている。本拙文を理解するために、インターネットの紹介記事などを用いて頂きたい。

「R」と「直行表による実験データの解析」

長畑先生著「Rで学ぶ実験計画法」を読んでいたとき、「R」と「直交法による実験計画法」を組合わせたとき、新製品開発時に有効な「要因の絞り込み」に威力を発揮してくれるに違いないと感じて今回の報告書作成となった。「R」と「直交表による実験」の組み合わせで、新製品開発の効率化ができると考えた。

「直交表による実験計画法」は旧電電公社の通信研究所で田口博士のグループで開発された。田口博士はその後渡米されて、1980年代のアメリカ合衆国の技術停滞打破に大きく貢献された。これにより「アメリカを蘇らせた男」と呼ばれ、日本人として3人目のアメリカの自動車殿堂入りを果たされた。また、日本でも多くの支持者によって品質工学会が設置されており、2年間で200事例に適用し、100億円以上の効果があった企業もあると言われている。

後半で、この2つを併用することによるメリットを理解して頂くために、「実施例」を取り上げた。実施例は、一番単純な直交表実験による例であるが、同じ手順で複雑な「割り付け表」によるデータ解析まで可能である。

実施例で説明する。

例題 1 測定を繰り返した直交実験の解析

(品質管理 谷津進、宮川雅巳共著 朝倉書店 P148 例12.3)

マイクロスイッチの温度上昇を防ぐため、部品の銀メッキ化が検討されている。どの部品にメッキすれば良いのかを調べるために、因子として、レバー A、アンカー B、稼働片 C、端子 D の4部品を取り上げ、それぞれ水準1はメッキあり、水準2はメッキなしとした。交互作用として A x B, A x C が考えられた。どの部品のメッキが有効か解析する。

割付表とデータ (第1表 割り付けと実験データ)

	要因	A	B	AxB	C	AxC	e	D	X
	列番	1	2	3	4	5	6	7	
実験番号	1	1	1	1	1	1	1	1	28.3
	2	1	1	1	2	2	2	2	29.9
	3	1	2	2	1	1	2	2	30.4
	4	1	2	2	2	2	1	1	38.2
	5	2	1	2	1	2	1	2	38.9

	6	2	1	2	2	1	2	1	41.6
	7	2	2	1	1	2	2	1	43.8
	8	2	2	1	2	1	1	2	61.3
成分	a	b	ab	c	ac	bc	abc		

分散分析表作成のために各列の平方和を求める。

列番	1	2	3	4	5	6	7
要因	A	B	AxB	C	AxC	誤差	D
水準 1 ①	126.8	138.7	163.3	141.4	161.6	166.7	151.9
水準 2 ②	185.6	173.7	149.1	171.0	150.8	145.7	160.5
①+②	312.4	312.4	312.4	312.4	312.4	312.4	312.4
①-②	-58.8	-35	14.2	-29.6	10.8	21	-8.6
平方和	432.18	153.125	25.205	109.52	14.58	55.125	9.245

以上の結果を用いて分散分析表を作成する。

要因		平方和 S	自由度 f	分散 V	分散比 Fo
レバー	A	432.18	1	432.18	7.84
アンカー	B	153.125	1	153.125	2.78
可動片	C	109.52	1	109.52	1.98
端子	D	9.245	1	9.245	0.17
	AxB	25.205	1	25.205	0.46
	AxC	14.58	1	14.58	0.26
	誤差	55.125	1	55.125	
	計	798.98	7		

$$F(1,1,0.05) = 161.4$$

試料数（実験回数）が少ないため有意となる要因はなかった。

「R」で同じデータを解析する。

「R」で解析するための準備

エクセル画面上で元データ（第1表 割り付けと実験データ）を修正する。

割り付け表中の水準値を表す「1」および「2」の前に「L」の小文字「1」をつける。

第2表 割り付けと実験データ

列番と実験番号は必要がないので、下記表のようにして、点線枠の中をコピー可能なクリックボードにする。（この場合、「要因」があると誤操作するから削除すること）

（第2表）

列番	1	2	3	4	5	6	7	°C
	A	B	e 3	C	e 5	e 6	D	X

実験 番号	1	1	1	1	1	1	1	1	28.3
	2	1	1	1	2	2	2	2	29.9
	3	1	2	2	1	1	2	2	30.4
	4	1	2	2	2	2	1	1	38.2
	5	2	1	2	1	2	1	2	38.9
	6	2	1	2	2	1	2	1	41.6
	7	2	2	1	1	2	2	1	43.8
	8	2	2	1	2	1	1	2	61.3

この実験では、交互作用 $A \times B$ と $A \times C$ を求めている。A は 1 列(成分 a)、B は 2 列(成分 b) したがって成分(ab)の出てくる 3 列は、交互作用 $A \times B$ のために割り付けできない。交互作用 $A \times C$ は、要因 C を 4 列(成分 c) に割り付けたから、第 5 列(成分 ac) に出てくる。第 5 列に割り付けることはできない。8 回の実験をランダムな順序で行っている。(注: $A \times B$ の出てくる列に e 3、 $A \times C$ の出てくる列に e 5、誤差列に e 6 と記入している。)

手順 1 と手順 2 「R」の Program File と「Rcmdr」をインストールする。

手順 3 実験データ(第 2 表) を「R」にインストールする。

メニュー画面で「データ」をクリック、新しく出てきた画面上で、「データのインポート」→「テキストファイルまたはクリックボード URL」→「クリックボードにチェック」→「OK」を順次クリックする。この操作で、データが「R」上にインストールされる。その後で、解析するファイルが、正しくインプットされていることを、「データセットを表示」をクリックして確認する。(エクセルによるデータ処理でドラッグしたデータが、呼び出されている。)

手順 4 次に分散分析することになるが、この実験では、データの構造式を次のようにしている。

$$X = A + B + C + D + A \times B + A \times C + (\text{誤差})$$

これら各項の要因が実験の各列に割り付けている。このことを次の画面で指定する。

メニュー画面で、「統計量」→「モデルへの適合」→「線型モデル」と順次クリックして「モデル名を入力」画面を呼び出す。2 つの空白のスプライン窓枠に順次「X」と「A + B + C + D + A × B + A × C」をインプットして「OK」をクリックする。

「A × B」と「A × C」は「A : B」「A : C」としている。

「OK」をクリックする。新しく 2 画面が続いて出てくるが無視してよい。

手順 5 メニュー画面で「モデル」→「仮説検定」→「分散分析表」を順次クリック。

新しい画面「R 分散分析表」が出てくる。

```
> Anova(LinearModel.2, type="II")
```

Anova Table (Type II tests)

Response: X

Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
--------	----	---------	--------

A	432.18	1	7.8400	0.2184
B	153.12	1	2.7778	0.3440
C	109.52	1	1.9868	0.3928
D	9.24	1	0.1677	0.7526
A:B	25.20	1	0.4572	0.6215
A:C	14.58	1	0.2645	0.6976
Residuals	55.13	1		

筆算で求めた分散分析表と同じ分散分析表を得ている。

ここで、効果の小さかった要因を誤差項にプーリングする

「D」と「A x C」を誤差項にプーリングする。

手順4に戻り、メニュー画面で、「統計量」→「モデルへの適合」→「線型モデル」と順次クリックして「モデル名を入力」画面を呼び出す。2つの空白のスプライン窓枠に順次「X」と「A+B+C+A x B」をインプットして「OK」をクリックする。

手順 5 メニュー画面で「モデル」→「仮説検定」→「分散分析表」を順次クリック。

新しい画面「分散分析表」が出てくる。

> Anova(LinearModel.3, type="II")

Anova Table (Type II tests)

Response: X				
	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
A	432.18	1	16.4223	0.02707 *
B	153.12	1	5.8186	0.09483 .
C	109.52	1	4.1616	0.13405
A:B	25.20	1	0.9578	0.39992
Residuals	78.95	3		

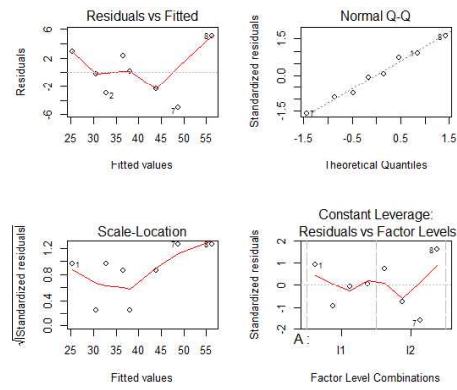
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

要因 A のみが5%有意となる。

手順6 分散分析後の推定・予測

(a) 基本的診断 メニュー画面で「モデル」→「グラフ」→「基本的診断プロット」の画面が出てくる。

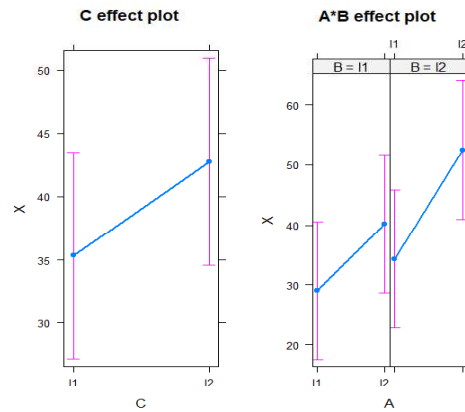
lm(X ~ A + B + C + A:B)



データの取り方などに問題がある場合、画面が乱れてくる。この4画面なら、問題が無いと判断できる（とのことである。）

(b) 効果プロット

メニュー画面で「モデル」→「グラフ」→「効果プロット」
次の画面が出てくる。



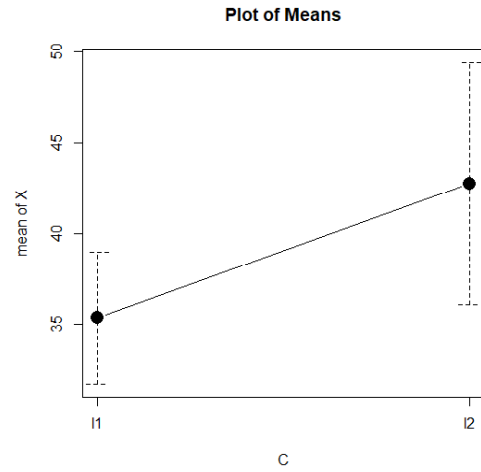
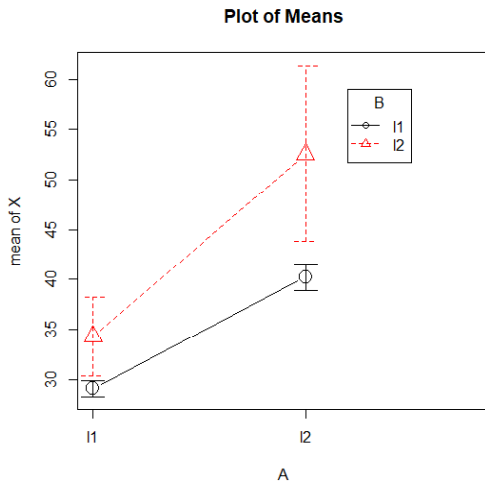
2回目の分散分析の結果である。分析の結果、要因「A」のみが5%有意であったが、「AxB」「C」のグラフをが出ている。

メニュー画面で「グラフ」→「平均のプロット」

「目的変数 X」「因子」「A」 or 「B」 で横軸 A・縦軸 AxB のグラフ

「目的変数 X」「因子」「C」 で横軸 C 縦軸 X のグラフ

を得ることができる。



2つのグラフから、 $A1, B1 = 29.1$ $A2, B2 = 52.6$ メッキしないと温度上昇は 23.5

$C1=35.4$ $C2=42.8$ メッキしないと温度上昇は 7.4

要因 A,B,C をメッキすることで温度上昇を約 30.9°C ($= 23.5+7.4$) 抑えることができる。

以上(18.7.23)

おわりに

在職中に懸案であった事項は、60歳代で大部分終了できた。あるテーマは、会社の次世代の継続プロジェクトとなり、またあるテーマは共栄会社の夜間無人稼働の考え方となった。学術誌に論文として採用されたものもあった。70才を経過してからも、過去の成果を引きずって、技術士(技術者)の体面を保つことができた。あるとき、そのような毎日を反省して、これからの余生を考えたとき愕然とした。

幸い、仏教に興味を持っていたので、短くてしかも評判の高い「般若心経」を勉強することにした。般若心経は、262文字の漢字で構成されていたが、「不」が8個、「無」が21個も使用されていて、この理由を知りたくなった。が、仏教について全く知識がなかったのでお釈迦様の初期仏教まで遡り調べることになった。この件に関して、H29.7.14の技術士業務研究会で報告できた。

「R」も「直交表による実験」についても、現在はよく知られたものである。ところがこの2つを組み合わせることによって、さらに新しい効用が生まれてくることを知った。

この手法の普及で、近畿 PE 技術相談室の発展に貢献でき、さらには企業の技術力の向上につながればと期待している。

(18. 8. 14)

公益社団法人日本技術士会近畿本部登録近畿 PE 技術相談室

<http://kinkipesodan.xsrv.jp/>