講座

農作業研究現場の統計学 (3)
— 計量技術学入門 —

遠くまで飛ぶ紙ひこうきを折る
— 機能的な分散分析表の形 —

執行 盛 之
独立行政法人 農業工学研究所

① t 値と F 値は兄弟の関係

この統計学シリーズの前回はほぼ20頁に亘るものになりました。読者にとっては、大層面倒であつたろうと推察します。書いた内容は、相当噛み砕いて理解し易く書いたつもりですが、「これだけのことを読まなければならない統計学なら、適わんな!!」と雑誌をそっと閉じてしまった人が殆どであろう。実験計画法を適用したからと言って、試験結果を「いわゆる分散分析表」として示すのであれば、それは使わなくても同じことだとして、しかしそう思われても仕方のない、これまでの分散分析表であり F 検定の手法でした。一方の t 検定や χ^2 検定は、与えられた条件の下で明快に結論を下してくれる手法なので重宝に活用されています。ところが F 検定と t 検定とは、実は兄弟の関係にあります。例えば自由度 6 の $F(1,6,0.05) = 5.987$ であり、 $t(6,0.05) = 2.447$ です。F 値を $\sqrt{}$ で開けば t 値となる、 $\sqrt{5.987} = 2.447$ なのです。主として 2 データの差異を論じるときに t 検定を使い、もっと多くの要因が絡んだ関係を解明するのに F 検定を使うだけで、本来は同じ切れ味を持つ手法なのです (F 表、次頁 t 表)。

F 検定が使われないとすれば、それは多くの要因を対象とする試験 (多要因試験) が実施されていないだけです。また F 検定を前提とした分散分析に「切れ味」が感じられないとすれば、それは分散分

F 表

$f_2 \backslash f_1$	①	2	3	4	5
1	161. 4052.	200. 5000.	216. 5403.	225. 5625.	230. 5764.
2	18.5 98.5	19.0 99.0	19.2 99.2	19.2 99.2	19.3 99.3
3	10.1 34.1	9.55 30.8	9.28 29.5	9.12 28.7	9.01 28.2
4	7.71 21.2	6.94 18.0	6.59 16.7	6.39 16.0	6.26 15.5
5	6.61 16.3	5.79 13.3	5.41 12.1	5.19 11.4	5.05 11.0
⑥	5.99 13.7	5.14 10.9	4.74 9.78	4.53 9.15	4.39 8.75
7	5.59 12.2	4.74 9.55	4.35 8.45	4.12 7.85	3.97 7.46
8	5.32 11.3	4.46 8.65	4.07 7.59	3.84 7.01	3.69 6.63
9	5.12 10.6	4.26 8.02	3.86 6.99	3.63 6.42	3.48 6.06
10	4.96 10.0	4.10 7.56	3.71 6.55	3.48 5.99	3.33 5.64

析表としてのまとめ方に創意と工夫が足りないのでしょう。こう書いても、一旦閉じてしまった読者の雑誌を再度開かせるまでには至らないでしょうが、私は実験計画法を長い間愛用してきました。農業の研究現場で、大変重宝な手法として実験計画法を展開する中で、試験結果はこのような分散分析表として示さなければ役に立たないとする形が定まりました。それが次の様式です。このような体裁の分散分析表としてまとめれば、定量的な考察が可能になりますし、次なる技術戦略を引き出すことができると考えています (再掲: 表33)。

平成14年10月21日受付
平成14年11月 2日受理
Corresponding author
執行盛之 Moriyuki SHIGYO
〒305-0856 茨城県つくば市観音台2-1-6
2-1-6 Kannondai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0856, Japan
E-mail: shigyo@affrc.go.jp

t 表

α 2a f	0.250 (.500)	.200 (.400)	.150 (.300)	.100 (.200)	.050 (.100)	<u>.025</u> (.050)	.010 (.020)	.005 (.010)	.0005 (.0010)
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.599
3	.765	.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924
4	.741	.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	.727	.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
⑥	.718	.906	1.134	1.440	1.943	<u>2.447</u>	3.143	3.707	5.959
7	.711	.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	.706	.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	.703	.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	.700	.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587

再掲：表33 新たな分散分析表の提起

要 因	水準付与係数		偏差平方和	自由度	分 散	F 値	寄与率 (%)
	1	2					
A：両端三角			25.2500	1	25.2500	8.78 ※	
B：紙の種類			3.5156	1	3.5156	1.22	
C：先端半折			33.9312	1	33.9312	11.79 ※	
D：両端上折			52.2006	1	52.2006	18.14 ※※	
F：前部重心			25.7556	1	25.7556	8.95 ※	
(A×B)			0.3906	1	0.3906	0.14	
(A×D)			17.0155	1	17.0155	5.91 ※	
(B×D)			29.9756	1	29.9756	10.42 ※	
誤 差			20.1395	7	2.8771		
全 体			208.1742	15			

1)

2)

②プーリングを行う。

上の分散分析表をみると、(A×B)交互作用の偏差平方和が0.3906と他の5要因や2交互作用に比べて極端に小さいことが分かります。当初は(A×B)交互作用も評価することが必要だと考えて、紙ひこうきの試験設定を行いました。しかし試験を実施した結果、(A×B)交互作用の偏差平方和(変動)は0.3906と殆ど無いたことが分かりました。試験の想定そのも

のに見込みに違いがあったわけですから、次のように考えて分散分析表にも変更を加える必要があります。

直交表への要因割付は表34上部の当初割付のように行いました。ここで再度分散分析表に戻り、誤差項の偏差平方和である20.1395について考えてみましょう。表34の要因・交互作用の割付で示すように(1)(2)(3)(4)(8)(9)(10)(15)の各列には、夫々に理由のある効果が現れるように試験設定しました。それ

表34 要因・交互作用の「L₁₆(2¹⁵)2水準系直交表」への当初割付とプーリング

群 番 号	1		2		3				4						
列 番 号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
当 初 割 付	A	B	AB	C				D	AD	BD					F
					e	e	e				e	e	e	e	
プーリング後	A	B		C				D	AD	BD					F
			e		e	e	e				e	e	e	e	

では要因や交互作用が割り付けられていない(5)(6)(7)(11)(12)(13)(14)の7列の偏差平方和には、どのような効果が現れているのでしょうか？ 紙ひこうき試験における誤差項ですから、これには①紙ひこうきを折るときの僅かな折り目の違い、②空に向かって投げ上げる時の僅かな角度の違いと、③力の入れ具合の僅かな違い、④上の方での僅かな風の影響などの制御することが不可能な「偶然誤差」と、⑤3要因以上の高次交互作用の効果、⑥無視できると考えた幾つかの2次交互作用の効果などいわゆる「系統誤差」の効果とが混然となっているのです。前者の偶然誤差は避け難いものですし、後者の系統誤差は試験設定の段階で無視できると考えたことです。したがって本試験では、要因として採用したA～Fの5要因と3つの交互作用の中で、誤差項に現れる「偶然誤差＋系統誤差」を遥かに凌駕する程の効果を示すものがどれであるか？を見定めているのです。これがF検定と分散分析を適用する統計学の立場なのです。

再掲表33の分散分析表で、夫々の偏差平方和を自由度で割った分散値は「自由度1単位量に揃えた変動」になりますから、誤差項の分散は2.8771です。これが偶然誤差と系統誤差を合計した変動ですから、この値を遥かに凌駕する要因や交互作用でなければ考察には取るに足らないわけです。まして、この誤差項の分散値2.8771にさえも達し得ない交互作用は「無視できた筈のもの」として、分散分析の段階で誤差項に合併する方が良いでしょう。これには①試験設定において見込み違いであったから、それを正して

おくという素直な反省と共に、実は②誤差の自由度を1でも多くすることでF検定値を小さくし、要因や交互作用をよりシャープに検定できるという実利もあります。

以上によって(A×B)交互作用は「無視できる程度の大きさ」であると分かったのですから、表34の中の(3)列は誤差列として扱うことが順当です。この(3)列を誤差項に合同させる手順をプーリングといいます。この結果、当初割付における誤差項は(5)(6)(7)(11)(12)(13)(14)の7列であったのが、(A×B)交互作用の(3)列を誤差項にプーリング(合同)することで誤差項は8列となりました。分かり易くいえば、誤差項の自由度が7から8になったわけです。要因・交互作用の割付で示すと、表33の下部「プーリング後」のようになります。また分散分析表における、このプーリングの具体的な手順は(A×B)交互作用の偏差平方和0.3906を誤差項の20.1395の合併し、(A×B)交互作用の自由度1も誤差項の7に合併させ、表35のようなプーリング後の分散分析表が得られます(表35)。

③ 寄与率の算出

このシリーズ(2)の冒頭「分散分析で明らかにしたいこと」において、次の図：分散の分割(その1)を示し、このような解析結果を得ることが解析の目標です、としました。

表35 プーリング後の分散分析表

要 因	水準付与係数		偏差平方和	自由度	分 散	F 値 (確率)	寄与率 (%)
	1	2					
A：両端三角			25.2500	1	25.2500	8.58 ※	
B：紙の種類			3.5156	1	3.5156	1.20	
C：先端半折			33.9312	1	33.9312	11.54 ※	
D：両端上折			52.2006	1	52.2006	17.75 ※※	
F：前部重心			25.7556	1	25.7556	8.76 ※	
(A×D)			17.0155	1	17.0155	5.79 ※	
(B×D)			29.9756	1	29.9756	10.19 ※	
誤 差			20.5301	8	2.9413		
(旧誤差 (A×B))			(20.1395 0.3906	(7 1			
全 体			208.1742	15			

1)

2)

3) 但し $F(1, 8, 0.05) = 5.32$

$F(1, 8, 0.01) = 11.3 (11.26)$

再掲：図 分散の分割（その1）

（飛行距離16データの全体変動を100%とすると、ABCDF要因で何%づつ説明でき、AB, AD, BDの2次交互作用で夫々何%説明できるか？）

L₁₆(2¹⁵) 2水準系直交表に基づいた16試験区では、夫々に異なった条件で紙ひこうきを折り、最大飛行距離は16.9m、最小距離は0.9mと大きく変動しました。このデータ変動の全体を100%とすれば、5つの要因と3つの交互作用によって何%づつを説明できるのかを明らかにし、次なる技術発展に資する多くの情報を得ることが分散分析です。供試した要因や交互作用が、目的変数、この試験の場合は紙ひこうきの飛行距離に及ぼす影響を定量的に示す指標が「寄与率(%)」です。試験を実施し、得られたデータ解析の第一段階としてプーリングを行った段階での分散の分割は次のようです。

図 分散の分割（その6）

この図と表35の分散分析表を見比べて、寄与率の算出は次のように行います。

$$\begin{aligned} \text{A 要因の寄与率} &= \frac{\text{A 要因の偏差平方和} - (\text{A 要因の自由度} \times \text{誤差の分散})}{\text{全体の偏差平方和}} \\ &= \frac{25.2500 - (1 \times 2.9413)}{208.1742} \\ &= \frac{25.2500 - 2.9413}{208.1742} = 0.107 \end{aligned}$$

寄与率は合計100.0%で示した方が理解し易いので、A 要因の寄与率：10.7%として示します。同様の算出手順で、他要因と交互作用の飛行距離に対する寄与率を算出します。この結果を分散分析表に示せば表36となり、図として示せば分散の分割（その7）となります。

表36 寄与率まで算出した分散分析表

要 因	水準付与係数		偏差平方和	自由度	分 散	F 値	寄与率 (%)
	1	2					
A：両端三角			25.2500	1	25.2500	8.58 ※	10.7
B：紙の種類			3.5156	1	3.5156	1.20	0.3
C：先端半折			33.9312	1	33.9312	11.54 ※	14.9
D：両端上折			52.2006	1	52.2006	17.75 ※※	23.7
F：前部重心			25.7556	1	25.7556	8.76 ※	11.0
(A × D)			17.0155	1	17.0155	5.79 ※	6.8
(B × D)			29.9756	1	29.9756	10.19 ※	13.0
誤 差			20.5301	8	2.9413		19.6
合 計			208.1742	15			100.0

1)

2)

図 分散の分割 (その7)

この寄与率を算出することで、要因や交互作用の飛行距離に及ぼす影響の程度が明確に理解できるでしょう。紙ひこうきの飛行距離に最も影響しているのは、寄与率が23.7%と最も高いD：両端上折の要因であることが分かります。2番目に飛行距離に影響している要因は、寄与率14.9%のC：両端半折の要因です。A：両端三角要因とF：前部重心要因の寄与率は10.7%、11.0%であることより、同じくらいの影響度を示しています。飛行距離に及ぼす影響の大きい方から順番に示せば、寄与率の順に次のようになります。

1. D：両端上折 (23.7%)
- ↓
2. C：両端半切 (14.9%)
- ↓
3. F：前部重心 (11.0%)
- ↓
4. A：両端三角 (10.7%)

交互作用についても同様に、BD交互作用の寄与率は13.0%を示しているので、A・F要因の寄与率を越える効果が期待できます。AD交互作用の寄与率は6.8%と大きくはないのですが、分散分析においても5%水準で有意差がありますので十分配慮して考察を進めるべきです。要因や交互作用の影響の大きい順番が明らかになったと共に、その影響度が23.7%、11.0%、6.8%と定量的に把握できたことも、結果の考察に厚みを加えてくれます。

このようにA要因の寄与率というのは、飛行距離データの全体変動を100%として、その内の何%を説明しているか？ということを示すものです。そうであれば、寄与率の算出法は次によってもよいのではないかと、即ち、分子の(A要因の自由度×誤差の

分散)の部分が何故必要なのか？と読者は等しく疑問に感じられるでしょう。

$$A \text{ 要因の寄与率} = \frac{A \text{ 要因の偏差平方和}}{\text{全体の偏差平方和}}$$

前項のプーリング手順の説明において、 $L_{16}(2^{15})$ 2水準系直交表で要因や交互作用を割り付けなかった(3)(5)(6)(7)(11)(12)(13)(14)列に現れた偏差平方和は20.5301でした。そして、これは実際的には避けられない偶然誤差と系統誤差とが入り混った形で現れていると説明しました。この偏差平方和を誤差項の自由度8で割った分散値は2.9413となります。自由度1単位量当たりの誤差分散が2.9413であるなら、A要因の寄与率を算出するに当たってもA要因の自由度分の誤差分散に相当する分を差し引き、純粋の変動値で計算した方が良くと統計学では考えるのです。もっと分かり易く説明します。このシリーズ(2)の表29には、飛行距離データを基本に則って膨大な電卓計算を積み上げる手順を示しました。この表の末尾には、次のような「要因と平方和」の整理がなされています。寄与率の算出に当たって自由度1単位量の分散値を差し引く考え方と手順を追記すれば、表37のようになります。したがってA要因固有のあるいは純粋な寄与率の算出には－(A要因の自由度×誤差の分散)の部分が必要なのです。

$$A \text{ 要因の寄与率} = \frac{A \text{ 要因の偏差平方和} - (A \text{ 要因の自由度} \times \text{誤差の分散})}{\text{全体の偏差平方和}}$$

ここで、再掲表33段階の(A×B)交互作用を残したままの分散分析表まで遡って、寄与率を考えるとしましょう。偏差平方和が小さくて、誤差項の分散値までに届かない(A×B)交互作用の寄与率を算出すると、次のようです。

$$\begin{aligned} (A \times B) \text{ 交互作用の寄与率} &= \frac{(A \times B) \text{ 交互作用の偏差平方和} - (A \times B) \text{ 交互作用の自由度} \times \text{誤差の分散}}{\text{全体の偏差平方和}} \\ &= \frac{0.3906 - (1 \times 2.8771)}{208.1742} \\ &= \frac{0.3906 - 2.8771}{208.1742} = -0.0119 \end{aligned}$$

(A×B)交互作用の寄与率は－0.0119(－1.19%)と負の値をとります。もとの偏差平方和が小さいとは

言え0.3906と正の値なのに、それに基づいて算出した寄与率が負値となることは受け入れられません。したがって分散分析に寄与率を導入するという考えは、それに先立ち必ずプーリングを行うことが前提となっており、プーリングと寄与率の算出とは一対のものであると、理解して下さい。

⑤ 再度プーリングの手順へ

寄与率の算出を終えた段階で、再度プーリングの手順を考える必要があります。寄与率を記載した分散分析表で、B要因の偏差平方和が3.5156と小さく、分散値も同じ3.5156で誤差項の2.9413と余り変わらないことを、どのように扱うか？を考えなくてはなりません。いわゆるプーリングする①第一の条件は、誤差項の分散値以下の偏差平方和しか持たない交互作用で、これは文句無くプーリングして結構です。②第2の条件は、偏差平方和が小さく、しかも寄与率が2.0％以下の要因と交互作用をプーリングして下さい。この第2条件によれば、B要因をプーリングすることに間違いはありません。しかし要因間の交互作用ではなく「供試要因」そのものの場合は、目的変数の飛行距離に殆ど影響が無かったことを分散分析表の中にも残しておくのが通常です。というのは、別の人が後々同じような試験を設定する場合に、B要因は影響が小さいことを分散分析表に明記しておく方がよいとする配慮からです。③この飛行試験の場合は、B要因に係わる交互作用のうち(B×D)交互作用に5％水準で有意差が認められます。関係する交互作用が有る場合には、B要因そのものの偏差平方和が小さくとも、B要因が存在することに意味がありますので、プーリングしないで分散分析表に

残してください。この紙ひこうきの場合に、B要因は③の理由によってプーリングをしてはなりません。この再度のプーリング検討も経た分散分析が最終的なもので、表36の結果が以降の解析対象となります。B要因の単体そのものは有意差が認められないのですから解析の対象にはなりませんが、交互作用を説明する要素としてのB要因は有効なのです。

⑥ 水準付与係数を記載する。

紙ひこうき試験データの基本的な解析手順を説明していますが、読者も十分に感じられているように、全ての手順は平均値とその変動についての計算を幾重にも重ねているわけです。飛行距離の平均値は7.4313mです。「16データの平均値は7.4313mでした」という単純な表現形式に対して、色々な制約条件を付けるのが統計解析であるというわけです。そうなのですから、各々の制約条件についても、7.4313mという平均値に対する付与係数として表現しておいた方が理解し易い。例えば「A：両端三角を折る水準と折不ない水準とでは5％水準で有意差がある」と表現するよりも、「両端を折る水準では平均飛行距離を1.2562m延ばすし、両端を折不ない水準では－1.2562mとなって遠くまで飛ばないことになり、これは5％の有意水準である」と表現すれば、平均値に対する十程度の定量的な考察も可能になり、全体的な理解も更に進みます。これはA1・A2水準の平均値からの偏差数量ですが、数量化理論で用いられる付与係数という考え方を導入して「水準付与係数」と表現することにしましょう。－1.2563～1.2562までの格差である2.5125は、A要因に付与される係数になりますが、これを各要因毎に算出する

表37 自由度1単位量の分散値と寄与率の関係

列番号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
割 付	A	B	C				
(プーリング後)			e		e	e	e
平方和	25.2500	3.6100	0.3600	33.9306	0.6006	0.1406	0.6006
自由度1単位量の分散値	誤差項を構成↓ [自由度1単位量の分散値＝(平方和の合計÷自由度)＝29.9756÷8＝2.9413]				誤差項を構成↓		
	25.2500	3.6100	0.3600	33.9306	0.6006	0.1406	0.6006
列固有の偏差平方和→	-2.9413	-2.9413		-2.9413			
寄与率(%)	22.3087	0.6687		30.9893			
	10.7	0.3		14.9			

と前項で算出した寄与率の大きさと全く同じ内容になります。したがって要因間の比較には寄与率(%)の方を用いて、水準間の比較に当たってのみ付与係数を算出することにしましょう。

例えばA要因のA1水準への付与係数は、A1水準の平均値の総平均からの偏差である。再掲表14に示されるように、A1水準8データの平均は8.6875で、総平均は7.4313mなので、偏差は(8.6875－7.4313)1.2562である(再掲表14)。即ち、A1水準のように両端を三角に折ると、総平均の7.4313mの飛行距離を＋1.2562mと延ばす効果がある。同じようにA2水準の「両端を三角に折らない」場合の平均は6.1750なので、総平均からの偏差は(6.1750－7.4313)－1.2563となる。この偏差を水準付与係数として、分散分析

表に記載します。しかしこれらの係数を、改めて算出する必要はありません。シリーズ2表13のYatesの算法によるデータ解析では、右から4列目の効果欄の2行以下に示してあるのが各列の第1水準の付与係数になりますし、同じく表29のデータ解析の基本手順では、第1水準の偏差と第2水準の偏差の値が、夫々の付与係数となります。平均値に対する効果を付与係数として示したのですから、分散分析表には注書きとして平均の値7.4313mを添記しておきましょう。またB要因そのものは有意差がないので考察の対象となりませんが、(B×D)交互作用の要素としては有効ですので、水準付与係数も括弧書きにして転記しておきましょう。

再掲：表14 A要因(1)列の偏差平方和の算出

A 1 水 準		A 2 水 準	
試験区	飛行距離	試験区	飛行距離
No.1	8.8	No.9	8.5
2	6.1	10	2.0
3	16.9	11	10.1
4	4.2	12	6.6
5	9.1	13	0.9
6	5.7	14	6.7
7	11.3	15	8.3
8	7.4	16	6.3
合 計	69.5	合計	49.4
A1平均	8.6875	A2平均	6.1750
偏 差	8.6875－7.4313 ＝1.2562		6.1750－7.4313 ＝－1.2563
偏 差 平 方	(1.2562) ² ＝1.5780		(－1.2563) ² ＝1.5783
偏差平方和	1.5780×8データ ＝12.6240		1.5783×8データ ＝12.6264
25.2504			

(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
D	AD	BD					F
			e	e	e	e	
52.2006	17.0156	29.9756	2.0306	14.6306	2.0306	0.1056	25.7556

誤差項を構成↓

[自由度1単位量の分散値＝(平方和の合計÷自由度)＝29.9756÷8＝2.9413]

52.2006	17.0156	29.9756	2.0306	14.6306	2.0306	0.1056	25.7556
-2.9413	-2.9413	-2.9413					-2.9413
49.2593	14.0743	27.0343					22.8143
23.7	6.8	13.0					11.0

⑦ 交互作用の水準組合せ毎の効果（付与係数）

夫々5%水準で有意差のあった(A×D)と(B×D)交互作用の場合も、水準組合せ毎の付与係数を算出します。(A×D)交互作用の場合の組合せ効果は、シリーズ(2)の⑭として解説し、水準組合せの付与係数は表25に示しています。分散分析表内には十分なスペースが取れないので、次のような約束事で付与係数を転記することにしましょう。

(A×D) 水準組合せ効果			
要因 水準		D	
		1	2
A	1	+1.0311	-1.0313
	2	-1.0313	+1.0313

↓

分散分析表への転記			
要因		水準付与係数	
		1	2
A×D	(A1・D1)	1.0311	(A1・D2) -1.0313
	(A2・D1)	-1.0313	(A2・D1) 1.0313

(B×D)交互作用の水準組合せの効果も、シリーズ(2)の⑭に準じた手順で算出すれば次のようです(表37)。

要因の水準付与係数と水準組合せ毎の付与係数までを記載した分散分析表は、表38のようです。

⑧ 仲々利用してくれない実験計画法

分散分析を前提とした実験計画法のメリットは素晴らしい大きいのですが、実は利用してくれる人は殆どいないのです。利用してくれない理由の一つは、完全実施型の分散分析を採用すると試験区数が多くなり勝ちなことがあります。これに対処するには、このシリーズで解説している直交表などの「一部実施型の実験計画法」を勉強すればよいのですが、程良い解説書が無い状況で勉強しようとしても仲々の難物ですね。一部実施型を構成している考え方の一つ一つは極めて機械的で単純なのですが、関係する要素の数が多すぎるので、ややもすると人間の頭の方が混乱してしまいます。

しかし利用してくれない本当の理由は、次のようです。現在の分散分析法は5%・1%水準で有意性検定を実施して、F値に※印が付くか・付かないかが試験結果の全てであり、※印が付かない場合はその一年間の試験がパーになってしまい兼ねないという懸念です。特に農業試験のように、一年間に一回の作付試験しかできない場合には深刻です。翻って「だからこそ実験計画法を活用しなければならないです」と説明しても、仲々分かってくれません。供試要因に有意差がないことを明らかにしたことをこそ評価すべきでなのですが、それとても試験実施者の

表37 (B×D)水準組合せ毎の効果（付与係数）

B	D	D	
		1	2
B	1	8.8, 16.9, 8.5, 10.1	6.1, 4.2, 2.0, 6.6
		合 計 44.3	18.9
		平 均 11.075	4.725
		総平均 -7.4313	総平均 -7.4313
		B1水準 -0.4687	B1水準 -0.4687
	2	D1水準 -1.8063	D2水準 -(-1.8063)
		効果 1.3688	効果 -1.3687
		9.1, 11.3, 0.9, 8.3	5.7, 7.4, 6.7, 6.3
		29.6	21.6
		7.400	6.525
		-7.4313	-7.4313
		B2水準 -(-0.4688)	B2水準 -(-0.4688)
		D1水準 -1.8062	D2水準 -(-1.8063)
		効果 -1.3687	効果 1.3688

表38 水準付与係数まで算出した分散分析表

要 因	水準付 与係数		偏差平方和	自由度	分 散	F 値	寄与率 (%)
	1	2					
A：両端三角	1.2562	－1.2563	25.2500	1	25.2500	8.58 ※	10.7
B：紙の種類	(0.4687)	(－0.4688)	3.5156	1	3.5156	1.20	0.3
C：先端半折	－1.4563	1.4562	33.9312	1	33.9312	11.54 ※	14.9
D：両端上折	1.8062	－1.8063	52.2006	1	52.2006	17.75 ※※	23.7
F：前部重心	－1.2688	1.2687	25.7556	1	25.7556	8.76 ※	11.0
(A×D)	11: 1.0311 21: －1.0313	12: －1.0313 22: 1.0313	17.0155	1	17.0155	5.79 ※	6.8
(B×D)	11: 1.3688 21: －1.3687	12: －1.3687 22: 1.3688	29.9756	1	29.9756	10.19 ※	13.0
誤 差			20.5301	8	2.9413		19.6
合 計			208.1742	15			100.0

1) 平均値は7.4313 m 2)

目の付け処に思慮が足りないように受けとられ勝ちです。このように一年間に流した汗と努力が霧散したら大変だという懸念が、実験計画法を敬遠しています。これが、メリハリつけて評価する分散分析やF検定のシステムが、農業研究の実際の場面に普及・利用しない大きな理由です。

⑨ 農業試験における10%有意差

5%水準・1%水準の有意差とは一体どういうことだったのでしょうか？ 5%も1%確率も、一般的な言葉でいえば「めったに起こり得ないこと」を示しています。このシリーズの冒頭に、水戸黄門に出てくる丁半博打を例にとりて「5%水準とは殆ど人間の感覚がおかしいと思ひ始める閾値」であり、1%水準なら博徒は「イカサマだ!!」と尻をまくって居直ってもよい確率ですと説明しました。人間の感性に基づいた一つの判断基準ですから、これは共通基準であると認識しておかねばなりません。したがって5%・1%水準というのは、めったに起こり得ないという人間の感性から導かれた「影響している」、「明らかに影響している」という保証付きの確率なのです。保証付きの確率で検定しているので、結果としてメリハリの効いた評価が可能になります。ところがメリハリの効いたこの検定法は、一年間の苦労をいとも簡単に霧散してくれる「両刃の剣」でもあります。

5%・1%水準の検定は、統計学と実験計画法の約束事ですから大切ではありますが、私は農業研究者としての長い経験から「10%水準までの有意差」

は十分に考慮に値する基準であると考えています。1%水準が明らかに影響している、5%水準が影響していると判断できる基準なら、10%水準は「期待が持てる・傾向が有る」と判断することで、F検定に発展性と柔軟性をもたせる方がよいという提案です。統計表にも10%水準のF表が掲載されています。F表(10%水準)。

私が、10%水準までをも考慮するという理由は次の3つです。①農業実験も、特に圃場試験の場合には誤差の分散が大きくなり勝ちで、これを基準にしたF検定では、かなりの分散を持った要因でないと5%検定から漏れてしまい兼ねません。したがって10%水準のところまで考慮の網を張っておかないと、有用な情報まで逃してしまう懸念があります。②更に農業技術開発の素材としても「画期的」なものが段々と少なくなっています。そこで画期的に準ずる内容の技術素材であっても、幾つか素材を積み重ね、その交互作用を活用することで収量性や品質向上に役立てていかないと、技術開発が枯渇してしまいます。③5%、1%水準の有意差がないときのデータの考察には、10%水準の差異を理由付けしつつ考察している場合が殆どです。こういう実態があるので、農業試験の場合には始めから10%水準有意差を共通理解にした方がよいのではないかと思います。1%水準を「※※」、5%水準を「※」として示しますが、10%水準を「♣」「†」という印を付けて解説している書籍もあります。分散分析とF検定を農業試験の実際に適用して、その結果を技術化に役立たせるという観点から見ても、従来のように※印有無の論議に終始するF検定であり実験計画

F 表 (10%水準)

$F(\phi_1, \phi_2; 0.10)$

(分子の自由度, 分母の自由度のF分布の上側10%の点を求める表)

$\phi_2 \backslash \phi_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	39.9	49.5	53.6	55.8	57.2	58.2	58.9	59.4	59.9	60.2
2	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39
3	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23
4	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92
5	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30
6	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94
7	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70
8	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54
9	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.41
10	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32
11	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25
12	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19
13	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14
14	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10
15	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06
16	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03
17	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00
18	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98
19	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96
20	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94

法であるとすれば、今後も活用されることは無いでしょう。実験計画法による試験結果をもっと信頼して、あと一步踏み出した理解が行われるべきだ・・・と私は考えます。最近のベイズ統計学などを紹介しているレポートにおいても、5%有意水準は一つの基準であると軽く考えておいた方がよいとの論調も見受けられます。農業研究の場合でも現実がこうなのですから、統計の学問もこの方向に展開して来るに違いありません。

⑩ F 値に有意水準を添記する。

F 検定の結果に発展性と柔軟性を持たせるため、10%有意水準を示す「♣」「+」の印を分散分析表に記入することには、未だかなりの抵抗があるものと思われます。それは今後の検討課題にして、ここではF値の有意水準の値そのものを分散分析表に記載して、10%有意水準にも十分に思いを致した考察を行いましょう。

F 値の正確な有意水準を手計算で求めるのは殆ど困難なので、次にBasicのプログラムを紹介します(次頁参照)。

このプログラムは、①要因・交互作用の自由度、②誤差項の自由度、③要因・交互作用のF値を入力すると、自動的にF値の%点を出力する。例えばA要因の場合は、①1、②8、③8.58と入力して、%点の1.9が得られます。A要因のF値は1.9%点なので1%有意水準までは届かないが、5%有意水準であるということです。この%点を、分散分析表のF値の欄に転記します。

(メモ) なお分散分析においても多水準要因では多

農業試験では、10%確率も考慮の範囲に入れる

農業試験として
考慮に入れても
よい範囲。

統計的に有意差あり。

F 値%点を求めるプログラム

```

1000 ' F ノ ハーセント テン
1010 CLS 3
1030 ' -- テータ --
1035 '
1040     INPUT "ヨウイン DF= ";DF1
1050     INPUT "コサ DF= ";DF2
1060     INPUT "ヨウイン Fチ= ";U
1070 '
1130 W1=DF2/(DF2+DF1*U)
1140 W2=SQR(1-W1)
1150 MDF=2*INT(DF1/2)-DF1+2
1160 NDF=2*INT(DF2/2)-DF2+2
1170 IF MDF>1 AND NDF>1 THEN 1270
1180 IF MDF>1 AND NDF<=1 THEN 1250
1190 IF MDF<=1 AND NDF>1 THEN 1230
1200 IF MDF<=1 AND NDF<=1 THEN 1210
1210 '' Ix(1/2,1/2), Ux(1/2,1/2)
1220 Q=1-2/3.14159*ATN(W2/SQR(W1))
1225 W3=W2*SQR(W1)/3.14159 : GOTO 1290
1230 '' Ix(1,1/2), Ux(1,1/2)
1240 Q=1-W2 : W3=W1*W2*.5 : GOTO 1290
1250 '' Ix(1/2,1), Ux(1/2,1)
1260 Q=SQR(W1) : W3=Q*(1-W1)*.5 : GOTO 1290
1270 '' Ix(1,1), Ux(1,1)
1280 Q=W1 : W3=Q*(1-W1)
1290 '' recurrence procedure
1300 FOR IFU=NDF TO DF2 STEP 2
1310     JFU=IFU
1320     IF DF2<=IFU THEN GOTO 1360
1330     Q=Q-2/IFU*W3
1340     W3=W3*W1*(MDF+IFU)/IFU
1350 NEXT IFU
1360 FOR IFU=MDF TO DF1 STEP 2
1370     IF DF1<=IFU THEN GOTO 1410
1380     Q=Q+2/IFU*W3
1390     W3=W3*(1-W1)*(IFU+JFU)/IFU
1400 NEXT IFU
1410 IF Q<0 THEN Q=0
1420 PRINT USING "Fチ %テン= ##.#### %";Q*100
1430 PRINT:PRINT:GOTO 1040
    
```

なお、このプログラムは「パソコン統計解析ハンドブックⅢ実験計画法編」田中・垂水編共立出版1986で公表されているソフト AOVmの一部に入出力部を筆者が付加したものです。

重比較を行います。この場合に適用した多重比較法（例えばTukey法）を明記しておく欄が表外注 2) です。この紙ひこうき試験の場合は2水準要因なので多重比較は必要ありませんでした。

⑪ 次頁表39として示した形式が、紙ひこうき試験の結果を余すところ無く表現した機能的な分散分析表なのです。

⑫ 紙ひこうき試験を $L_{16}(2^{15})$ 2水準系直交表に基づいて飛行実験を行い、試験設定の考え方とデータ解析の手順を詳しく解説してきました。これまで

に解説したポイントになる部分を次に転載して、分散分析結果の考察に続けます。

【1. 試験目的】

紙ひこうきは、子供・成人を問わずに魅力的な折り紙であるが、遠くまで飛ばすのは仲々難しい。テレビ番組「伊藤家の食卓」で紹介された折り方は航空力学の知識を応用した折り方なので、誰でも遠くまで飛ばせるという。また実際に体育館の中では18.5mの飛行距離を示した。新しい折り方のポイントを明らかにし、各々のポイントが飛行距離の延長に寄与する程度を定量的に把握する。

表39 機能的な分散分析表

要 因	水準付 与係数		偏差平方和	自由度	分 散	F 値 (F %点)	寄与率 (%)
	1	2					
A：両端三角	1.2562	−1.2563	25.2500	1	25.2500	8.58 ※	10.7
B：紙の種類	(0.4687)	(−0.4688)	3.5156	1	3.5156	1.20	0.3
C：先端半折	−1.4563	1.4562	33.9312	1	33.9312	11.54 ※	14.9
D：両端上折	1.8062	−1.8063	52.2006	1	52.2006	17.75 ※※	23.7
F：前部重心	−1.2688	1.2687	25.7556	1	25.7556	8.76 ※	11.0
(A×D)	11: 1.0311 21: −1.0313	12: −1.0313 22: 1.0313	17.0155	1	17.0155	5.79 ※	6.8
(B×D)	11: 1.3688 21: −1.3687	12: −1.3687 22: 1.3688	29.9756	1	29.9756	10.19 ※	13.0
誤 差			20.5301	8	2.9413		19.6
合 計			208.1742	15			100.0

1) 平均値は7.4313m

【2．試験方法】

① 供試要因と実験計画法

「伊藤家の食卓」で紹介された新しい紙ひこうきの折り方のなかで、従来の折り方に比べて異なる5点を供試要因とした。各要因の水準は、航空力学を応用した新しい折り方と従来の折り方の2水準として、2次交互作用としては(A×B)(A×D)(B×D)を考えた。試験条件は②のようであり、これを「L₁₆(2¹⁵)2水準系直交表」に割り付けて飛行試験を実施した。

要 因	水 準		直交表 割付列
	第1水準	第2水準	
A 両端三角	三角に折る	折らない	(1)
B 紙の種類	1：√2	1：2	(2)
C 先端半折	折らない	半分に折る	(4)
D 両端上折	上に折る	折らない	(8)
F 前部重心	セロテープ	セロテープ ＋クリップ	(15)

② 供試要因と水準内容

③ 調査項目：飛行距離 (0.1m)

再掲：表10 試験区の試験条件と飛行距離

列番号	(1)	(2)	(4)	(8)	(15)列	飛行距離 データ(m)
要 因	A要因	B要因	C要因	D要因	F要因	
実 験 番 号	1 1：三角	1：1：√2	1：－	1：上折	1：セロテープ	8.8
	2 1：三角	1：1：√2	1：－	2：－	2：＋クリップ	6.1
	3 1：三角	1：1：√2	2：半分	1：上折	2：＋クリップ	16.9
	4 1：三角	1：1：√2	2：半分	2：－	1：セロテープ	4.2
	5 1：三角	2：1：2	1：－	1：上折	2：＋クリップ	9.1
	6 1：三角	2：1：2	1：－	2：－	1：セロテープ	5.7
	7 1：三角	2：1：2	2：半分	1：上折	1：セロテープ	11.3
	8 1：三角	2：1：2	2：半分	2：－	2：＋クリップ	7.4
	9 2：－	1：1：√2	1：－	1：上折	2：＋クリップ	8.5
	10 2：－	1：1：√2	1：－	2：－	1：セロテープ	2.0
	11 2：－	1：1：√2	2：半分	1：上折	1：セロテープ	10.1
	12 2：－	1：1：√2	2：半分	2：－	2：＋クリップ	6.6
	13 2：－	2：1：2	1：－	1：上折	1：セロテープ	0.9
	14 2：－	2：1：2	1：－	2：－	2：＋クリップ	6.7
	15 2：－	2：1：2	2：半分	1：上折	2：＋クリップ	8.3
	16 2：－	2：1：2	2：半分	2：－	1：セロテープ	6.3

再掲：表39 紙ひこうき試験の分散分析表

要 因	水準付 与係数		偏差平方和	自由度	分 散	F 値 (F % 点)	寄与率 (%)
	1	2					
A：両端三角	1.2562	－1.2563	25.2500	1	25.2500	8.58 ※	10.7
B：紙の種類	(0.4687)	(－0.4688)	3.5156	1	3.5156	1.20	0.3
C：先端半折	－1.4563	1.4562	33.9312	1	33.9312	11.54 ※	14.9
D：両端上折	1.8062	－1.8063	52.2006	1	52.2006	17.75 ※※	23.7
F：前部重心	－1.2688	1.2687	25.7556	1	25.7556	8.76 ※	11.0
(A×D)	11: 1.0311 21: －1.0313	12: －1.0313 22: 1.0313	17.0155	1	17.0155	5.79 ※	6.8
(B×D)	11: 1.3688 21: －1.3687	12: －1.3687 22: 1.3688	29.9756	1	29.9756	10.19 ※	13.0
誤 差			20.5301	8	2.9413		19.6
合 計			208.1742	15			100.0

1) 平均値は7.4313m

【試験結果の概要・図表】

再掲図 分散の分割 (その6)

【試験結果の考察】

- 1) 紙ひこうきには、B 1 水準 ($1:\sqrt{2}$) には A 4 版のコピー用紙、B 2 水準の ($1:2$) には短辺を A 4 版 (21cm) に合わせて切り抜いた B 4 版のコピー用紙を用いた。また定規などを用い、試験設定と試験区順序に基づきながら紙ひこうきを丹念に折り込んだ (折り方の試験条件)。
- 2) 飛行試験は 5 月 16 日の午前 10:00 から、農業工学研究所の本館南側緑地内において試験区順序に沿って実施した。飛ばしたのは一人で、事前に試技を重ねて無理のない投げ方を決め、2 回投げたデータを平均した。飛行試験にほぼ 1.5 時間を要したが、この間、晴天で殆ど風は無かった (試技の試験条件)。
- 3) 16 試験区全体の平均飛行距離は 7.4313m であったが、試験区によって大きく異なり、最大飛行距

離は No. 3 区の 16.9m、最短飛行距離は No. 13 区の 0.9m であった。最大と最短飛行距離にはほぼ 20 倍の違いがあった (データ全体の変動)。

- 4) これまで通常の紙ひこうきの折り方を水準内容で示せば ($A2 \cdot C1 \cdot D2 \cdot F1$) であり、この組合せの試験区は 2.0m で最短距離の 0.9m に近く、また航空力学を応用した折り方は ($A2 \cdot C2 \cdot D1 \cdot F2$) で、この組合せの試験区が No. 3 区で最大飛行距離の 16.9m を実現していた。したがって航空力学の応用は飛行距離を延ばしているものと見られ、B 要因の「紙の種類 ($1:\sqrt{2}$, $1:2$)」は飛行距離には影響が少ないものと見られる (データの概略から考察できること)。
- 5) 分散分析の結果、飛行距離全体の変動のほぼ 8 割は要因と交互作用によって説明できており、要因の選択は適切であることが伺われた。また誤差項の寄与率は 19.6% と低く、飛行試験も精度良く実施されたことが分かった (分散分析の全体的な評価)。
- 6) 供試要因の中では、D：両端上折要因の寄与率が最も大きく 23.7% で、1% 水準で有意であった。次いで C：先端半切要因の 14.9%、A：両端三角と F：前部重心の寄与率は 10.7%・11.0% と変わらない程度で、いずれも 5% 水準で有意差が認められた。一方、B：紙の大きさ要因が飛行距離に及ぼす影響は無いものとみられる (供試要因の影響度合い)。
- 7) 交互作用の中では、(A：両端三角×D：両端上折) の交互作用が 5% 水準で 6.8% の寄与率、また (B：紙の種類×D) 交互作用も 13.0% の寄与

率で有意であった。したがってB：紙の種類要因は、単体として飛行距離に影響を及ぼすことはないが、交互作用の要素としては飛行距離に影響を及ぼしていることが分かった。また交互作用が認められるAとDの要因は単独で考えるべきではなく、適切な水準組合せのセットで適用すれば飛行距離を更に延長できる。同じくBとD要因の水準もセットで適用すべきである（交互作用の効果と水準組合せ）。

8) (A×D)と(B×D)の双方の交互作用にD要因が関与しており、出来れば3要因の適切な水準組合せが適用できれば望ましい。しかし(A×B×D)の3次交互作用は認められなかった（高次交互作用の有無の可能性）。

9) F要因は単独の効果で飛行距離を延ばしており、水準付与係数の値より、前部にかなりの重心をかけたF 2水準で1.2687m遠くまで飛び、重心をかける程度が小さかったF 1水準では飛行距離の平均値を-1.2688m引き下げた。したがってどの程度の前部重心までが飛行距離の延長に効果的なのか興味もたれる（水準付与係数の活用と今後の試験展開）。

10) 紙ひこうきの両翼の端を上折り上げたD 1水準では、これだけで1.8062m飛行距離が延びた。また先端を三角にして折り込んだC 2水準の付与係数は+1.4562mで、このことも前部に重心をかけてコンパクトな紙ひこうきに仕上げる結果となって飛行距離を延ばしたものと推測される。A要因として検討した、翼前部の両端を三角に折り込んだA 1水準も飛行距離を延ばす効果があり、付与係数で+1.2562mの効果が認められた。以上により、要因単体で飛行距離を延ばす水準は夫々A 1, C 2, D 1, F 2であり、いずれの水準とも「伊藤家の食卓」では航空力学を応用した折り方

として紹介された内容であり、その効果は明確であった（要因単独の飛行距離延長効果）。

11) 交互作用(A×D)の効果は再掲図2に示すように、飛行距離が延びる水準組合せは(A 1×D 1)であり、要因単体の効果と一致した。(A 1×D 1)水準を組み合わせることで、飛行距離を更に1.0311m延ばすことができる。また(B×D)交互作用の効果は、次の図3に示すように(B 1×D 1)の組合せが飛行距離を延ばし、効果は+1.3688mであった。このように航空力学を応用した紙ひこうきの折り方というのは、先に述べたように単体でも飛行距離を

再掲図2 (A×D) 交互作用

図3 (B×D) 交互作用

表40 2種類の検討（プーリングを含む）

列 番 号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
効 果	a	b	ab	c	ac	bc	abc
当初割付	A	B	AB	C			
平 方 和	25.2500	3.6100	0.3600	33.9306	0.6006	0.1406	0.6006
	↑ 誤差項にプーリング						
割 付 (2種類の検討後)	A	B		C			
			e		e	e	e

- 延ばすことが可能であり、しかも要因（折り方）同士の相乗効果で更に飛行距離の延長が実現できることにも特徴が見られる（新しい折り方の特性）。
- 12) したがってB：紙の種類要因は交互作用の要素として飛行距離の延長に関与しており、この点からB 1水準の $1:\sqrt{2}$ （黄金比）を選択する方が望ましい。
- 13) 以上のことより、紙ひこうきの飛行距離を延ばすのに航空力学を応用した4つの折り方は大いに効果が認められ、それらの相互作用も有意であった。（航空力学の専門家であれば、引き続いて技術的にも色々な考察が可能になろう。）
- 14) 最も遠くまで飛ばすことができるのは（A 1×B 1×C 2×D 1×F 2）の水準組合せである。分散分析の結果から、最良の水準組合せの場合の飛行距離の期待値は、要因と交互作用の効果が相加的なので、次の計算より15.6185 mと推定できる（水準付与係数を用いた期待値の算出）。

飛行距離の平均値	7.4313 m
A 1水準の効果	+1.2562
B 1水準の効果	—
C 2水準の効果	+1.4562
D 1水準の効果	+1.8062
F 2水準の効果	+1.2687
(A×D) 効果	+1.0311
(B×D) 効果	+1.3688
合 計	15.6185 m

（メモ）この場合、B要因そのものには有意差が認められなかったことより、上記のようにB 1水準の効果は加算しない方がよい。

⑬ 一般的な農業試験の精度と誤差の寄与率 — お詫びにかえて —

賢明な読者は既にお気づきでしょうが、直交表データの解析において大事な点の説明を敢えて省略しています。紙ひこうき試験データの分散分析に当たり、②のプーリングの項において偏差平方和が小さい(A×B)交互作用を誤差項へプーリングする必要性を説明しました。これは試験設定時に(A×B)交互作用は評価しておく必要があると考えたのに、実際試験した結果からみて交互作用は見られない。したがって試験の想定が誤っていたのだから、素直に反省してプーリングするということでした。そうであれば、逆のこともあり得ます。即ち、試験想定の際は「無い」だろうと思っていた交互作用が、試験結果の偏差平方和が大きくて有意差も認められそうだという場合です。このような場合も素直に反省して、誤差として割付していた列に「交互作用」を立ち上げねばなりません。直交表とそれに基づく分散分析は、このように極めて機能的な側面を持っています。具体的には表37で示した(12)列の平方和14.6306は、安易に誤差項として扱ってよい数値ではないのです(表40)。

この(12)列には、何らかの2次交互作用が現れていると考えるべきであり、効果として示す英小文字cdから(C×D)交互作用の効果であることが推測でき、これを新たに立ち上げる必要があります。即ち表40の下段として示す割付で分散分析を行うのが正しく、このようにした場合の分散分析表は表41のようになる。この紙ひこうきデータの分散分析結果としては、これが正しい。

しかし一般的な農業試験においては、誤差項の寄与率が30～35%位で納まっていれば先ずは成功の部類であると思ってよい。誤差の寄与率が50%を越え

(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
d	ad	bd	abd	cd	acd	bcd	abcd
D	AD	BD					F
			e	e	e	e	
52.2006	17.0156	29.9756	2.0306	14.6306	2.0306	0.1056	25.7556
↑							
交互作用(C×D)を立ち上げ							
D	AD	BD		CD			F
			e		e	e	

表41 2種類の検討（プーリングを含む）を行った割付による分散分析表

要 因	水準付与係数		偏差平方和	自由度	分 散	F 値	寄与率 (%)
	1	2					
A：両端三角			25.2500	1	25.2500	29.96 ※※	11.7
B：紙の種類			3.5156	1	3.5156	4.17	1.6
C：先端半折			33.9312	1	33.9312	40.26 ※※	15.9
D：両端上折			52.2006	1	52.2006	61.94 ※※	24.7
F：前部重心			25.7556	1	25.7556	30.56 ※※	12.0
(A×B)			17.0155	1	17.0155	20.19 ※※	7.8
(A×D)			29.9756	1	29.9756	35.57 ※※	14.0
(B×D)			14.6306	1	14.6306	17.36 ※※	6.6
誤 差			5.8995	7	0.8428		5.7
全 体			208.1742	15			100.0

$$\begin{cases} F(1, 7, 0.05) = 5.59 \\ F(1, 7, 0.01) = 12.2 \end{cases}$$

るような結果は、試験が大雑把に行われて精度が劣り、結果の再現性に問題があるデータとして留意すべきです。これとは逆の理由で、この解析結果のように誤差項の寄与率が5.7%というのは出来過ぎの試験であり、眉唾ものとして試験の実施状況について多くの質問が集中するでしょう。したがってこの場合は、紙ひこうきという誤差の入り込み難い試験であったから寄与率が小さくなったと理解して下さい。読者は農作業などを対象とする農学研究者であるから、本来多くの誤差の発現を前提に試験を進めなければなりません。直交表を適用しているからと言って、統計学を過度に期待してはなりません。直交表を適用した試験であるからこそ注意深く推進することが必要です。(C×D)交互作用を無視して解説を

進めたのも、このような理由があつてのことなのでご了承下さい。以上で「遠くまで飛ぶ紙ひこうきを折る－直交表による実験計画法の適用－」の解説を終わります。

- ⑭ 直交表に直接関わる参考文献として、次のものを挙げておきます。
- 1. パソコン統計解析ハンドブックⅢ実験計画法 編 田中豊他 共立出版 (1986)
 - 2. 実験計画法 ー上・下ー 田口玄一 丸善 (昭和51)
 - 3. 農業実験計画法小史 奥野忠一 日科技連 (1994)
 - 4. 入門実験計画法 永田 靖 日科技連 (2000)