

## 生産・提供、設計、商品企画における調査・実験と解析 実験2B

鈴木 朝陽

2024 年 11 月 26 日

### 1. 目的

設計の役割は、要求事項と既存の技術を適当に対応付け、要求事項を満たすために必要となる新たな技術を特定し、その開発を行うことである。そして新たに開発した技術と既存の技術を活用し、具体的な実現方法を定めることである。

私は所属する Chuo 社から紙ヘリコプターの設計に任命された。本実験における要求事項は紙ヘリコプターの飛行時間を長くすることである。そして本実験の目的は、紙ヘリコプターの飛行時間の長さに影響を与える条件を特定することであり、どのような設計条件の組み合わせのときに飛行時間が最も長くなるか、そのときの飛行時間はどのくらいになると予測できるかを特定することである。そして、本実験では自由に水準を選んだ 8 種類の実験と  $L_8(2^7)$  直行配列表を用いた 8 種類の実験を用いる。この 2 つの実験を比較し、実験計画法がどのような点で有効かを考察することである。

### 2. 実験方法と得られたデータ

特性を紙ヘリコプターの飛行時間とした。実験において水準数を 2 とし、用いる因子を表 1 に示した。

表 1 用いる因子

因子	水準	
	第1水準	第2水準
A.翼の切り込みの有無	なし	あり
B.翼の長さ	7cm	12cm
C.胴体の長さ	9cm	6cm
D.胴体の幅	2cm	3cm
F.胴体に付けるクリップの数	2個	1個
G.胴体の切り込みの有無	あり	なし
H.紙の種類	120g/m <sup>2</sup> (0.126mm)	200g/m <sup>2</sup> (0.200mm)

紙ヘリコプターの作成方法を以下に示した。紙ヘリコプターの構図を図 1 に示した。カットする線を引いた紙を図 2 に示した。

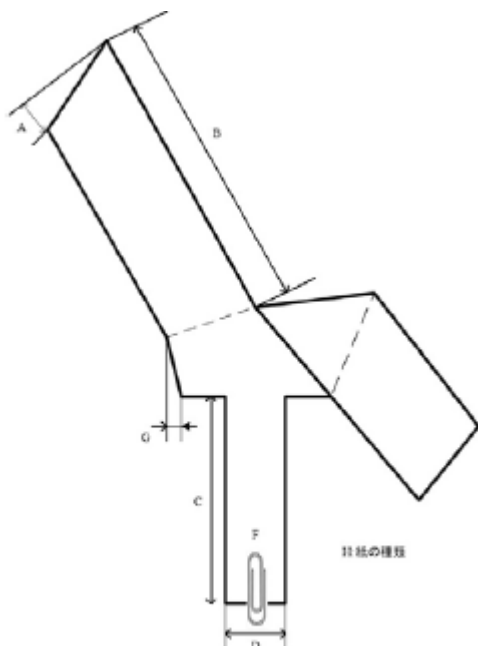


図1 紙ヘリコプターの構造

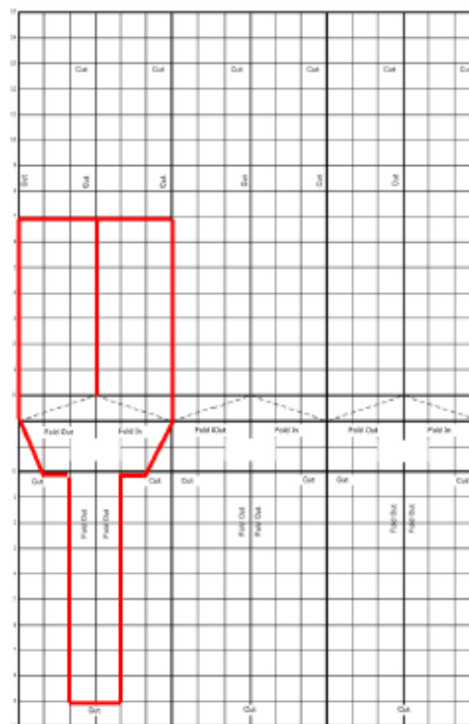


図2 カットする線を引いた紙

- ① 条件 H に基づいて紙を選んだ。紙には予め補助線が引いてある。1 枚の紙で 3 台のヘリコプターが作れる。
- ② 図 2 のように条件 A～D と G に従ってカットする線を引いた。作成した紙ヘリコプターに実験 No.を記した。
- ③ ②の線に沿ってはさみをカットした。
- ④ 点線に沿って右の翼は手前に、左の翼は奥に直角になるように折り曲げた。
- ⑤ 胴の下・中央部分に、条件 F で決まったクリップを付けた。

飛行時間の測定方法を以下に示した。

- ① 手で翼の付け根を持ち、胴の下端が丁度 2m になる高さになるよう保持した。
- ② 掛け声で手を離し、胴の下端が地面に着くまでの時間をストップウォッチで計測した。
- ③ 測定は 3 回繰り返した。

## 2.1 自由に水準を選ぶ実験

特性要因図を作成し、図 3 に示した。

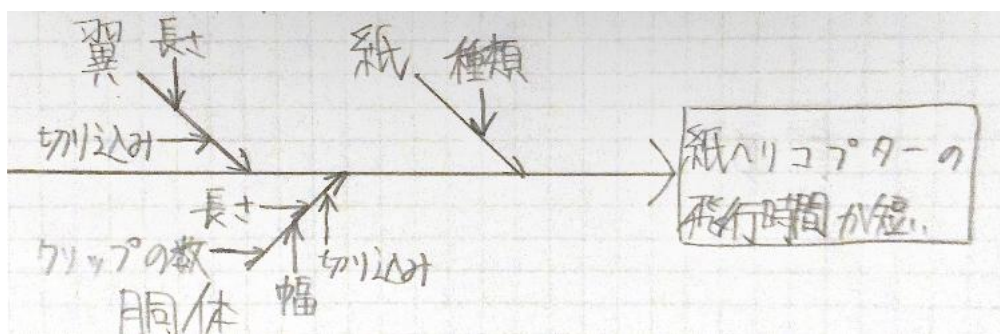


図3 特性要因図

図3を用いて、仮説を立てた。仮説を立て、考えた仮説に基づいて自由に水準を選び実験した。飛行時間を長くするためには、紙ヘリコプターが落下する際に起きる翼の空気抵抗を大きくすることが重要であると考えた。そこで空気の抵抗を大きくするため、翼の長さの因子をより面積の大きい第2水準（12cm）とした。また、紙ヘリコプターが落下する原因は重力が主であると考えられる。重力は質量と重力加速度で求まる。したがって翼の長さを長くする分、紙ヘリコプターの質量がより軽くなる水準を選んだ。胴体の長さは第2水準（6cm）、胴体の幅は第1水準（2cm）、胴体に付けるクリップの数は第2水準（1個）、紙の種類は第1水準（120 g/m<sup>2</sup>）とした。<sup>[2]</sup>プロペラのイメージ図を図4に示した。

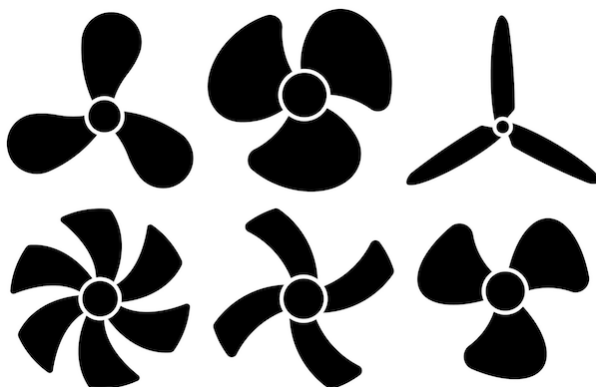


図4 プロペラのイメージ図

図4のようなプロペラは扇風機等に使われているが、このプロペラの形は風を送りやすくするためのものだと考察した。このことから、翼の切り込み、胴体の切り込みは紙ヘリコプターに風通しを良くしてしまい、空気抵抗を減らす原因になると考えた。したがって、翼の切り込みは第1水準（なし）、胴体の切り込みは第2水準（なし）とした。自由に水準を選んだ実験を実験 No.1 とし、実験 No.2~8 はそれぞれ1つの因子の水準を変更した。1種類の紙ヘリコプターについて3回ずつ飛行時間を計測し、記録を取った。自由に水準を選んだときの実験結果を表2にした。

表2 因子の水準を1つずつ動かして実験した場合の記録表

実験 No	因子 A	因子 B	因子 C	因子 D	因子 F	因子 G	因子 H	時間 1	時間 2	時間 3	平均 値

1	1	2	2	1	2	2	1	1.14	1.44	1.56	1.38
2	2	2	2	1	2	2	1	1.21	1.42	1.83	1.49
3	1	1	2	1	2	2	1	1.43	1.36	1.37	1.39
4	1	2	1	1	2	2	1	1.73	2.05	1.82	1.87
5	1	2	2	2	2	2	1	1.42	1.70	1.25	1.46
6	1	2	2	1	1	2	1	1.32	1.62	1.63	1.52
7	1	2	2	1	2	1	1	1.97	1.90	1.81	1.89
8	1	2	2	1	2	2	2	0.89	1.44	0.92	1.08

## 2.2 $L_8(2^7)$ 直行配列表を用いた実験

$L_8(2^7)$  直行配列表を用いて実験を計画した。計画に従って8種類の紙ヘリコプターを作成した。1種類の紙ヘリコプターについて3回ずつ飛行時間を計測し、記録を取った。Excelを開き、セルに「=RANDBETWEEN(1,8)」と入力し、Enterを押して乱数を発生させた。発生された数字と同じ列番号の実験から行った。 $L_8(2^7)$  直行配列表を用いた実験結果を表3に示した。

表3  $L_8(2^7)$  直行配列表を用いて実験した場合の記録表

実験 No	因子 A	因子 B	因子 C	因子 D	因子 F	因子 G	因子 H	実験 順序	時間 1	時間 2	時間 3	平均 値
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.33	1.31	1.32	1.32
2	1	1	1	2	2	2	2	6	1.59	1.46	1.56	1.54
3	1	2	2	1	1	2	2	2	1.64	1.44	1.42	1.50
4	1	2	2	2	2	1	1	3	1.49	1.77	1.92	1.73
5	2	1	2	1	2	1	2	5	1.43	1.32	1.28	1.34
6	2	1	2	2	1	2	1	4	1.18	1.29	1.25	1.24
7	2	2	1	1	2	2	1	7	1.64	1.62	1.79	1.68
8	2	2	1	2	1	1	2	8	1.58	1.61	1.26	1.48

## 3. 解析と結果

### 3.1 自由に水準を選んだ場合(分散分析、要因効果図、最適水準における母平均の推定)

因子の水準を1つずつ動かした実験では、因子が直行していない。そのため、No.1～No.8の因子の組み合わせを一つの因子 Z とし、一元配置実験として解析した。表2のデータを用い、因子 A～Hの間には交互作用がないと考えて、分散分析を行った。データの構造式を以下に示した。

$$x_{ij} = \mu + z_i + \varepsilon_{ij}$$

表2のデータを可視化したグラフを図4に示した。

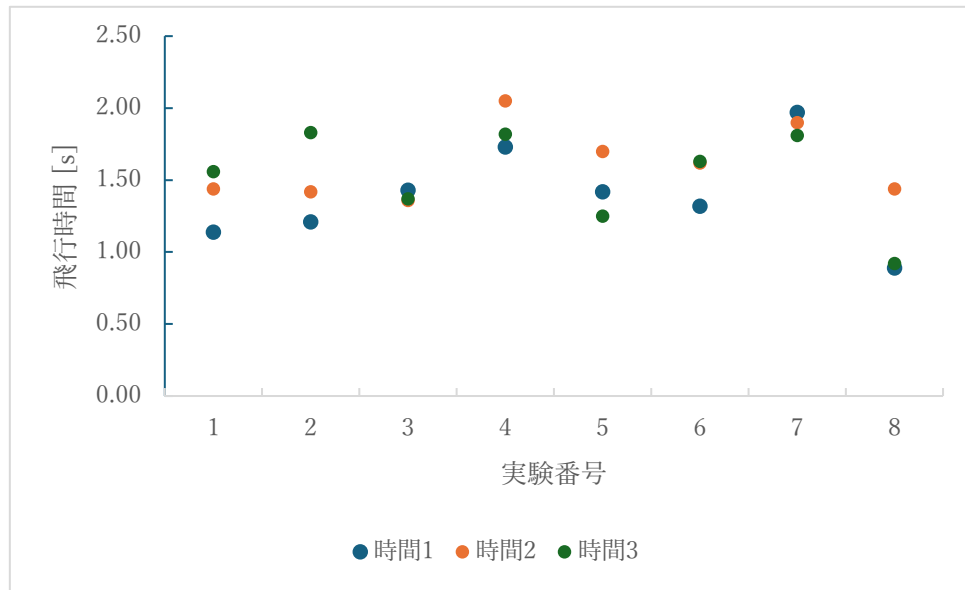


図4 データのグラフ化（1）

図4より、同じ実験番号の中でデータのばらつきが大きく、実験の精度が低いようにうかがえる。

次に仮説を設定した。

$$H_0 : z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5 = z_6 = z_7 = z_8 = 0 \ (\sigma_z^2 = 0),$$

$$H_1 : z_i \text{が少なくとも一つは} 0 \text{ではない} (\sigma_z^2 > 0, i = 1 \sim 8).$$

平方和と自由度を以下のように計算した。

$$CT = \frac{(1.14 + 1.44 + \dots + 0.92)^2}{24} = 54.69 \dots \approx 54.7$$

$$ST = (1.14^2 + 1.44^2 + \dots + 0.92^2) - CT = 2.195 \dots \approx 2.20$$

$$SS_Z = \frac{(1.14 + 1.44 + 1.56)^2 + \dots + (0.89 + 1.44 + 0.92)^2}{3} - CT = 1.476 \dots \approx 1.48$$

$$SS_E = SS_T - SS_Z = 0.7193 \dots \approx 0.719$$

$$\phi_T = 24 - 1 = 23$$

$$\phi_Z = 8 - 1 = 7$$

$$\phi_E = \phi_T - \phi_Z = 23 - 7 = 16$$

以上より、一元配置実験の分散分析表を表4に示した。

表4 一元配置実験の分散分析表

要因	SS	$\Phi$	V	F	E(V)
Z	1.48	7	0.211	4.69	$\sigma_E^2 + 3\sigma_Z^2$
E	0.719	16	0.0450		$\sigma_E^2$

$$\frac{T}{2.19} = 23$$

$$F(7, 16 : 0.05) = 2.66, F(7, 16 : 0.01) = 4.03$$

表 4 より、有意水準 1 % として F 検定を行った。

$$F_0 = \frac{V_Z}{V_E} \cong 4.69 \geq F(7, 16 : 0.01) = 4.03$$

したがって主効果 Z は有意水準 1 % において有意であり、帰無仮説は棄却された。すなわち、No.1~No.8 は有意であるといえるため、 $\mu(Z_i)$  の点推定を行った。

$$\mu(i) \text{ の点推定値 : } \widehat{\mu(Z_1)} \cong 1.38$$

$$\widehat{\mu(Z_2)} \cong 1.49$$

$$\widehat{\mu(Z_3)} \cong 1.39$$

$$\widehat{\mu(Z_4)} \cong 1.87$$

$$\widehat{\mu(Z_5)} \cong 1.46$$

$$\widehat{\mu(Z_6)} \cong 1.52$$

$$\widehat{\mu(Z_7)} \cong 1.89$$

$$\widehat{\mu(Z_8)} \cong 1.08$$

以上を用い、要因効果図を図 5 に示した。

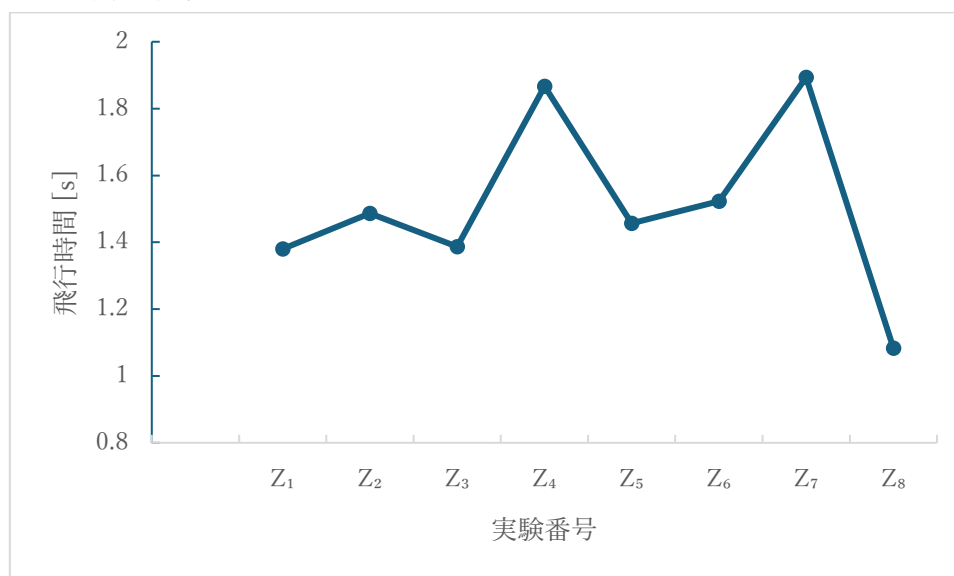


図 5 要因効果図 (1)

図 5 から、実験 No.1 より飛行時間が長い実験は実験 No.2, 3, 4, 5, 6, 7 であることがわかった。また、実験 No.7 は実験 No.1 より約 0.513 秒飛行時間が長いことがわかった。次に最適水準を求めた。実験 No.1 と実験 No.2~8 それぞれの平均値の差を表 4 に示した。

表 4 実験 No.1 との平均値の差

実験番号	No.1 との差
No.2	0.107

No.3	0.00667
No.4	0.487
No.5	0.0767
No.6	0.143
No.7	0.513
No.8	-0.297

表 4 より、実験 No.1 との差が正の値になった実験の、実験 No.1 と異なる水準を最適水準とした。したがって最適水準は、 $A_2B_1C_1D_2F_1G_1H_1$ である。続いて最低水準における母平均の推定を行った。

$$\begin{aligned}
& \mu(A_2B_1C_1D_2F_1G_1H_1) \text{ の点推定値} : \mu(A_2B_1\widehat{C_1D_2}F_1G_1H_1) \\
& = 1.389 + 0.1067 + 0.00667 + 0.4867 + 0.07667 + 0.1433 + 0.5133 \\
& = 2.713 \approx 2.71
\end{aligned}$$

### 3. 2 L8直行配列実験の場合(分散分析、要因効果図、最適水準における母平均の推定、予測区間)

表 3 のデータを用い、因子 A～H の間には交互作用がないと考えて、分散分析を行った。データの構造式を以下に示した。

$$\begin{aligned}
x_1 &= \mu + a_1 + b_1 + c_1 + d_1 + f_1 + g_1 + h_1 + \varepsilon_1 \\
x_2 &= \mu + a_1 + b_1 + c_1 + d_2 + f_2 + g_2 + h_2 + \varepsilon_2 \\
x_3 &= \mu + a_1 + b_2 + c_2 + d_1 + f_1 + g_2 + h_2 + \varepsilon_3 \\
x_4 &= \mu + a_1 + b_2 + c_2 + d_2 + f_2 + g_1 + h_1 + \varepsilon_4 \\
x_5 &= \mu + a_2 + b_1 + c_2 + d_1 + f_2 + g_1 + h_2 + \varepsilon_5 \\
x_6 &= \mu + a_2 + b_1 + c_2 + d_2 + f_1 + g_2 + h_1 + \varepsilon_6 \\
x_7 &= \mu + a_2 + b_2 + c_1 + d_1 + f_2 + g_2 + h_1 + \varepsilon_7 \\
x_8 &= \mu + a_2 + b_2 + c_1 + d_2 + f_1 + g_1 + h_2 + \varepsilon_8
\end{aligned}$$

データをグラフ化した図を図 6 に示した。

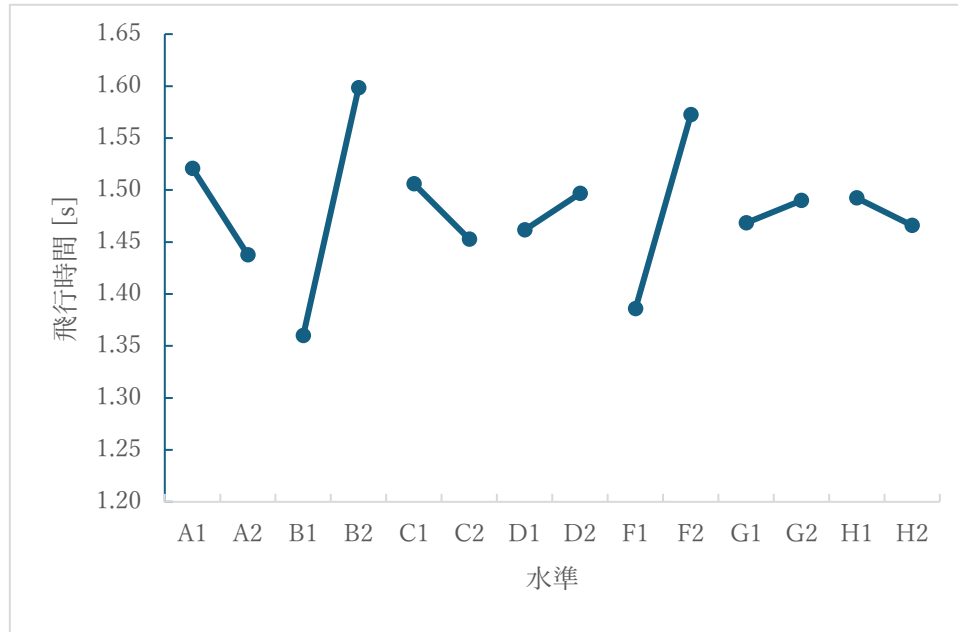


図6 データのグラフ化(2)

図6より、因子B、Fの傾きが大きく、主効果が存在しそうである。その他の主効果は存在が危ういが検定を用いて確かめた。

次に仮説を設定した。

$$\begin{aligned}
 &\begin{cases} H_0: a_1 = a_2 = 0 (\sigma_A^2 \neq 0) \\ H_1: \text{少なくとも1つは0ではない} (\sigma_A^2 > 0) \end{cases} \\
 &\begin{cases} H_0: b_1 = b_2 = 0 (\sigma_B^2 = 0) \\ H_1: \text{少なくとも1つは0ではない} (\sigma_B^2 > 0) \end{cases} \\
 &\begin{cases} H_0: c_1 = c_2 = 0 (\sigma_C^2 = 0) \\ H_1: \text{少なくとも1つは0ではない} (\sigma_C^2 > 0) \end{cases} \\
 &\begin{cases} H_0: d_1 = d_2 = 0 (\sigma_D^2 = 0) \\ H_1: \text{少なくとも1つは0ではない} (\sigma_D^2 > 0) \end{cases} \\
 &\begin{cases} H_0: f_1 = f_2 = 0 (\sigma_F^2 = 0) \\ H_1: \text{少なくとも1つは0ではない} (\sigma_F^2 > 0) \end{cases} \\
 &\begin{cases} H_0: g_1 = g_2 = 0 (\sigma_G^2 = 0) \\ H_1: \text{少なくとも1つは0ではない} (\sigma_G^2 > 0) \end{cases} \\
 &\begin{cases} H_0: h_1 = h_2 = 0 (\sigma_H^2 = 0) \\ H_1: \text{少なくとも1つは0ではない} (\sigma_H^2 > 0) \end{cases}
 \end{aligned}$$

分散分析表を作成するための計算補助表を表5に示した。

表5 計算補助表

列	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----



割り付け	A		B		C		D		F		G		H	
水準	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
データ	1.3	1.3	1.3	1.5	1.3	1.5	1.3	1.5	1.3	1.5	1.3	1.5	1.3	1.5
	2	4	2	0	2	0	2	4	2	4	2	4	2	4
	1.5	1.2	1.5	1.7	1.5	1.7	1.5	1.7	1.5	1.7	1.7	1.5	1.7	1.5
	4	4	4	3	4	3	0	3	0	3	3	0	3	0
	1.5	1.6	1.3	1.6	1.6	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3
	0	8	4	8	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	1.7	1.4	1.2	1.4	1.4	1.2	1.6	1.4	1.4	1.6	1.4	1.6	1.6	1.4
	3	8	4	8	8	4	8	8	8	8	8	8	8	8
T[k]1,	6.0	5.7	5.4	6.3	6.0	5.8	5.8	5.9	5.5	6.2	5.8	5.9	5.9	5.8
T[k]2	8	5	4	9	2	1	5	9	4	9	7	6	7	6
水準の 平均	1.5	1.4	1.3	1.6	1.5	1.4	1.4	1.5	1.3	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4
	2	4	6	0	1	5	6	0	9	7	7	9	9	7
T[k]1+ T[k]2	11.8		11.8		11.8		11.8		11.8		11.8		11.8	
T[k]1- T[k]2	0.333		-0.953		0.213		-0.140		-0.747		-0.087		0.107	
S[k]=( T[k]1- T[k]2)/ 8	0.0417		-0.119		0.0267		-0.0175		-0.0933		-0.0108		0.0133	

表 4 より、平方和を以下に示した。

$$S_A = S_{[1]} \doteq 0.0417$$

$$S_B = S_{[2]} \doteq -0.0119$$

$$S_C = S_{[3]} \doteq 0.0267$$

$$S_D = S_{[4]} \doteq -0.0175$$

$$S_F = S_{[5]} \doteq -0.0933$$

$$S_G = S_{[6]} \doteq -0.0108$$

$$S_H = S_{[7]} \doteq 0.0133$$

$$CT = \frac{(1.33 + 1.31 \dots + 1.26)^2}{24} = 52.51 \dots \doteq 52.5$$

$$S_T = (1.33^2 + 1.31^2 + \dots + 1.26^2) - CT = 0.8681 \dots \doteq 0.868$$

$$S_E = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D + S_F + S_G + S_H)$$

続いて、平方和の自由度を以下に示した。

$$\phi_A = \phi_B = \phi_C = \phi_D = \phi_F = \phi_G = \phi_H = 2 - 1 = 1$$

$$\phi_T = 24 - 1 = 23$$

$$\phi_E = \phi_T - (\phi_A + \phi_B + \phi_C + \phi_D + \phi_F + \phi_G + \phi_H) = 16$$

分散分析表を表 6 に示した。

表 6 L<sub>8</sub>直行配列表の分散分析表

要因	平方和 S[i]	自由度	平均平方 V	分散比 F0	E(V)
A	0.00463	1	0.00463	0.0927	$\sigma_E^2 + 12\sigma_A^2$
B	0.0379	1	0.0379	0.758	$\sigma_E^2 + 12\sigma_B^2$
C	0.00190	1	0.00190	0.0380	$\sigma_E^2 + 12\sigma_C^2$
D	0.000817	1	0.000817	0.0164	$\sigma_E^2 + 12\sigma_D^2$
F	0.0232	1	0.0232	0.465	$\sigma_E^2 + 12\sigma_F^2$
G	0.000313	1	0.000313	0.00627	$\sigma_E^2 + 12\sigma_G^2$
H	0.000474	1	0.000474	0.00949	$\sigma_E^2 + 12\sigma_H^2$
誤差 E	0.799	16	0.0499		$\sigma_E^2$
T	0.868	23			

$$F(1, 16; 0.05) = 4.49, F(1, 16; 0.01) = 8.53.$$

表 6 より、有意水準 5 % として F 検定を行った。

$$F_0 = \frac{V_A}{V_E} \cong 0.0927 \leq F(1, 16; 0.05) = 4.494$$

したがって要因 A は有意水準 5 % において有意であるとはいえず、帰無仮説は保留された。

$$F_0 = \frac{V_B}{V_E} \cong 0.758 \leq F(1, 16; 0.05) = 4.494$$

したがって要因 B は有意水準 5 % において有意であるとはいえず、帰無仮説は保留された。

$$F_0 = \frac{V_C}{V_E} \cong 0.0380 \leq F(1, 16; 0.05) = 4.494$$

したがって要因 C は有意水準 5 % において有意であるとはいえず、帰無仮説は保留された。

$$F_0 = \frac{V_D}{V_E} \cong 0.0164 \leq F(1, 16; 0.05) = 4.494$$

したがって要因 D は有意水準 5 % において有意であるとはいえず、帰無仮説は保留された。

$$F_0 = \frac{V_F}{V_E} \cong 0.465 \leq F(1, 16; 0.05) = 4.494$$

したがって要因 F は有意水準 5 % において有意であるとはいえず、帰無仮説は保留された。

$$F_0 = \frac{V_G}{V_E} \cong 0.00627 \leq F(1, 16; 0.05) = 4.494$$

したがって要因 G は有意水準 5 % において有意であるとはいえず、帰無仮説は保留された。

$$F_0 = \frac{V_H}{V_E} \cong 0.00949 \leq F(1, 16; 0.05) = 4.494$$

したがって要因 H は有意水準 5 %において有意であるとはいえず、帰無仮説は保留された。有意となる要因が見受けられなかったため、 $F_0$ 値が 0.100 未満であった要因 A、C、D、G、H をプールして再度分散分析を行った。プーリング後の誤差平方和と誤差自由度は以下のよう求めた。

$$S_{E'} = S_A + S_C + S_D + S_G + S_E = 0.8070 \dots \cong 0.807$$

$$\phi'_E = \phi_A + \phi_C + \phi_D + \phi_F + \phi_G + \phi_E = 21$$

プーリング後の分散分析表を表 7 に示した。

表 7 プーリング後の  $L_8$  直行配列表の分散分析表

要因	平方和 S[i]	自由度	平均平方 V	分散比 F0	E(V)
B	0.0379	1	0.0379	0.985	$\sigma^2 E + 12 \sigma^2 A$
F	0.0232	1	0.0232	0.604	$\sigma^2 E + 12 \sigma^2 A$
誤差 E	0.807	21	0.0384		$\sigma^2 E$
T	0.868	23			

$$F(1, 21; 0.05) = 4.32, F(1, 21; 0.01) = 8.02.$$

表 7 より、有意水準 5 %として F 検定を行った。

$$F_0 = \frac{V_B}{V_E} \cong 0.985 \leq F(1, 21; 0.05) = 4.32$$

したがって要因 B は有意水準 5 %において有意であるとはいえず、帰無仮説は保留された。

$$F_0 = \frac{V_F}{V_E} \cong 0.604 \leq F(1, 21; 0.05) = 4.32$$

したがって要因 F は有意水準 5 %において有意であるとはいえず、帰無仮説は保留された。プーリング後もなお有意となる要因は見受けられなかった。これは紙ヘリコプターの作成のばらつきと特に測定 of ばらつきが大きいことから考えられる。よって、今回の  $L_8$  直行配列表を用いた実験はかなり、精度が低い実験であったことがうかがえる。プールした A、C、D、G、H を紙ヘリコプターの作成の誤差とみなし、2 段階の検定を行う。再度プーリング後の分散分析表を表 8 に示した。

表 8 プーリング後の分散分析表 (2)

要因	平方和 S[i]	自由度	平均平方 V	分散比 F0
B	0.0379	1	0.0379	23.3
F	0.0232	1	0.0232	14.3
ヘリコプター作成の誤差	0.00813	5	0.00163	0.0326
誤差 E	0.799	16	0.0499	
T	0.868	23		

$$F(1, 5; 0.05) = 6.61, F(1, 5; 0.01) = 16.3.$$

表 8 より、有意水準 5 % として F 検定を行った。

$$F_0 = \frac{V_B}{V_E} \cong 23.3 \geq F(1, 5; 0.05) = 6.61$$

したがって要因 B は有意水準 1 % において有意であり、帰無仮説は棄却された。

$$F_0 = \frac{V_F}{V_E} \cong 14.3 \geq F(1, 5; 0.05) = 6.61$$

したがって要因 F は有意水準 5 % において有意であり、帰無仮説は棄却された。

次に有意となった要因の効果を推定した。

$$\mu(B_j) \text{ の点推定値 : } \widehat{\mu(B_1)} = \frac{1.32 + 1.54 + 1.34 + 1.24}{4} = 1.360 \dots \cong 1.36$$

$$\widehat{\mu(B_2)} = \frac{1.50 + 1.73 + 1.68 + 1.48}{4} = 1.506 \dots \cong 1.51$$

$$\mu(F_m) \text{ の点推定値 : } \widehat{\mu(F_1)} = \frac{1.32 + 1.50 + 1.24 + 1.48}{4} = 1.386 \dots \cong 1.39$$

$$\widehat{\mu(F_2)} = \frac{1.54 + 1.73 + 1.34 + 1.68}{4} = 1.573 \dots \cong 1.57$$

$$\mu(B_j) \text{ の 95\% 信頼区間 : } \widehat{\mu(B_j)} \pm t(5, 0.05) \sqrt{\frac{0.001626}{12}} = \widehat{\mu(B_j)} \pm 0.0299$$

$$1.33 \leq \mu(B_1) \leq 1.39$$

$$1.57 \leq \mu(B_2) \leq 1.63$$

$$\mu(F_m) \text{ の 95\% 信頼区間 : } \widehat{\mu(F_m)} \pm t(5, 0.05) \sqrt{\frac{0.001626}{12}} = \widehat{\mu(F_m)} \pm 0.0299$$

$$1.36 \leq \mu(F_1) \leq 1.42$$

$$1.54 \leq \mu(F_2) \leq 1.60$$

$$\text{最小有意差 : } lsd_{0.05} = t(5, 0.05) \sqrt{2 \times \frac{0.001626}{12}} = 0.04231 \dots \cong 0.0423$$

以上より、最適水準を求めるため、要因効果図を 7 に示した。

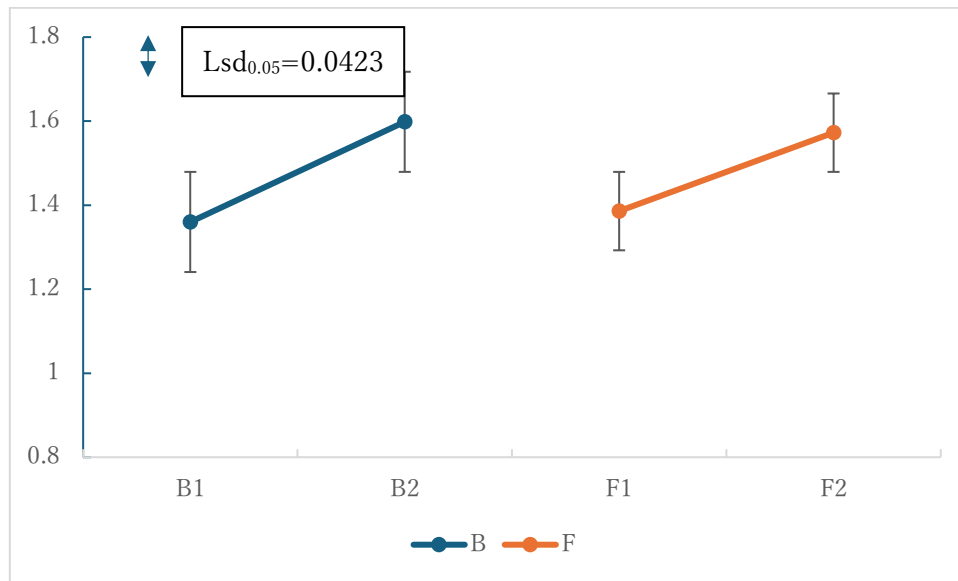


図7 要因効果図（2）

図7より最適水準は、 $B_2F_2$ である。

続いて最低水準における母平均を推定した。検定結果よりデータの構造式は以下となった。

$$x_s = \mu + b_j + f_m + \varepsilon_s$$

最低水準における点推定値、95%信頼区間は以下となった。

$$\begin{aligned} \mu(B_2F_2) \text{の点推定値} : \mu(\widehat{B_2F_2}) &= \bar{x}(B_2) + \bar{x}(F_2) - \bar{x} = 1.598 + 1.573 - 1.479 = 1.691 \dots \\ &\cong 1.69 \end{aligned}$$

$$\mu(B_2F_2) \text{の95\%信頼区間} : \mu(\widehat{B_2F_2}) \pm t(5, 0.05) \sqrt{\frac{0.001626}{12}} = \mu(\widehat{B_2F_2}) \pm 0.0299$$

$$1.66 \leq \mu(B_2F_2) \leq 1.72$$

最後に最低水準における将来データの予測を行った。

$$x(B_2F_2) \text{の95\%予測区間} : \mu(\widehat{B_2F_2}) \pm t(16, 0.05) \sqrt{\left(1 + \frac{1}{12}\right) 0.001626} = \mu(\widehat{B_2F_2}) \pm 0.108$$

$$1.58 \leq x(B_2F_2) \leq 1.80$$

### 3.3 確認実験の平均値の検定

最適水準の紙ヘリコプターを作成し、確認実験を行った。有意とならなかった要因について  $L_8(2^7)$  直行配列表を用いた実験において飛行時間の平均値が大きい方の水準を用いた。確認実験の結果を表9に示した。

表9 確認実験結果

因子	A	B	C	D	F	G	H	時間 1	時間 2	時間 3	平均値
水準	1	2	1	2	2	2	1	1.96	1.92	1.69	1.86

表9より、3回目の飛行時間は $x(B_2F_2)$ の95%予測区間内であったが、1、2回目の飛行時間は $x(B_2F_2)$ の95%予測区間外であった。これは、要因とは別の外的要因が加わり、 $x(B_2F_2)$ の95%予測区間にずれが生じていると考えた。しかし、 $L_8(2^7)$ 直交配列表を用いた実験のときのすべてデータの平均値は約1.48秒であったため、平均値を上回る結果となり、最適水準として相応しいと考えられた。

#### 4. 考察

##### 4.1 最適な設計条件

$L_8(2^7)$ 直交配列表を用いた実験の解析結果より、紙ヘリコプターの飛行時間に影響を与える設計条件は翼の長さと同体に付けるクリップの数であった。そして、翼は長く、胴体に付けるクリップの数は少ないほうが紙ヘリコプターの飛行時間が長くなりやすいことが分かった。

この条件のとき、飛行時間は1.58～1.80秒であると予測したが、確認実験よりこの予測にずれが生じていることがわかった。ずれが生じた原因として、測定方法のばらつきが主に挙げられる。紙ヘリコプターを落下させる際、手のべたつきで紙ヘリコプターを落下させた時間にずれが生じていたと考えた。さらに、実験回数を重ねることで紙ヘリコプターを落下させることに慣れが生じ、データにばらつきがでたと考えた。他に紙ヘリコプターの複数回の使用により、紙ヘリコプターの翼の折れ曲がり度に違いもみられた。今後、データのばらつきがでないよう紙ヘリコプターを落下させるのに機械を導入することや、人が紙ヘリコプターを落下させる場合、予備実験を3回行い実験に慣れた状態で始めること、1つの紙ヘリコプターは1回のみ計測を行うなどが今後の課題、改善策として挙げられた。

また自由に水準を選んだときの解析結果から、最適水準は翼の切り込みがなく、翼の長さが短く、胴体の長さが長く、胴体の幅が長く、胴体に付けるクリップの数が2個であり、胴体の切り込みがあり、紙の種類は軽い紙ヘリコプターであった。これは $L_8(2^7)$ 直交配列表を用いた実験の解析結果と真反対の結果となった。この結果の原因として、要因に交互作用があることを無視できないからではないかと考察した。今後は交互作用も含め検討すべきである。

実験方法により最適水準が異なる結果となってしまったが、それぞれ最適水準における母平均の推定の比較から、自由に水準を選んだときの解析結果によって得られた最適水準を本実験における最適水準として結論付けた。すなわち最適水準は、翼の切り込みがなく、

翼の長さが短く、胴体の長さが長く、胴体の幅が長く、胴体に付けるクリップの数が2個であり、胴体の切り込みがあり、紙の種類は軽い紙ヘリコプターであった。

#### 4. 2 2つの実験方法の比較

今回の実験を通して、自由に水準を選んだ実験と  $L_8(2^7)$  直交配列表を用いた実験について比較を行う。自由に水準を選んだ実験では、何を基準にするかや、どのように結果を比べたいかなどを目的に合わせて設定できる一方、水準ごとの実験回数に偏りが生じる。 $L_8(2^7)$  直交配列表を用いた実験では、水準ごとの実験回数は4回ずつと統一されており、規則的にデータを集計できる。また、実験計画法を使用することで、従来の実験より少ない回数で多数の因子の効果を同時に調べることができる。

#### 5. 結論

紙ヘリコプターの飛行時間に影響を与えている可能性の高い設計条件は翼の長さや胴体に付けるクリップの数であった。また最適水準は、翼の切り込みがなく、翼の長さが短く、胴体の長さが長く、胴体の幅が長く、胴体に付けるクリップの数が2個であり、胴体の切り込みがあり、紙の種類は軽い紙ヘリコプターであった。

本実験のように因子が多い場合は直交配列表を用いて実験を行うのが効果的であり、ある程度推測ができており、その要因について詳細に確認するときは自由に水準を選んで実験を行うのが効果的であると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 中央大学理工学部ビジネスデータサイエンス学科、「データサイエンス実験 A」、p.3~13 (2024) .
- [2] プロペラのイメージ図引用元、閲覧日：2024 年 11 月 24 日  
[https://jp.freepik.com/premium-vector/propeller-air-ventilator-propeller-fan-blade-equipment-propeller-blower-vector-illustration\\_50435602.htm](https://jp.freepik.com/premium-vector/propeller-air-ventilator-propeller-fan-blade-equipment-propeller-blower-vector-illustration_50435602.htm)