

後退翼機に於ける水平尾翼容積と重心位置の適性領域に関する研究

松戸ヒコーキクラブ 林 善明

<はじめに>

周知の通り、紙ヒコーキは主翼揚力と水平尾翼揚力の総和が機体重力とバランスし、かつ、重心まわりに発生するモーメントが主翼及び水平尾翼に働く空力と釣りあってはじめて機体を水平に保ち縦安定する。紙ヒコーキを設計する場合にこの目安となるのが水平尾翼容積（ V_h ）の値で、 V_h は次の計算式で求められる。

$$V_h = S_h \times L_h / S_w \times c$$

（ S_h = 尾翼面積、 S_w = 主翼面積、 L_h = 水平尾翼のモーメントアーム、 c = 空力平均翼弦長）

後述するように、重心位置と V_h には一次関数の関係があり、従来、許容幅を考慮すると右上図の斜線部分が適性領域とされている。この図は「紙ヒコーキで知る飛行の原理」（小林昭夫著 講談社）から転写したもので、図の斜線B以下の右下範囲は、「経験的に縦安定が不足する可能性があることを示しており、この範囲は使用しない方がよい」（同著）というのが一般的な“定説”である。

本稿は、筆者が好むデザインで、かつ垂直上昇性に優れ、ローリング（横揺れ）にも安定能力を持つといわれる後退翼機を用いて、 V_h と重心位置を測定し、定説化された“適性領域の普遍性”を再確認し、爾後の設計に活かすべく試みた一考察である。

<実験経過とデータ散布>

前著で小林氏は、適性領域内に「よく飛んだ」紙ヒコーキの設計値を8例図中にプロットしている。但し、後退翼の長所を認めながらも、「紙ヒコーキの飛行速度を考えれば、本来は後退翼はいらない」として全機が後退角ゼロ機体でのデータである。

筆者は比較的平穏な日を選び、バルサ翼PLGで、後退角ゼロの先達の名機（以下他機）と、筆者設計の後退翼機（以下自機）を4年間飛ばしてデータを集めた。他機6機及びそれなりに「よく飛んだ」自機16例を抽出して散布図を打ってみたのがA図である。

第6章 紙ヒコーキを設計し、飛ばす

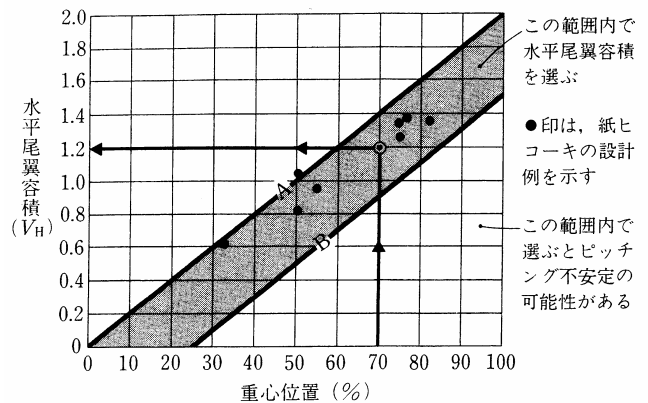
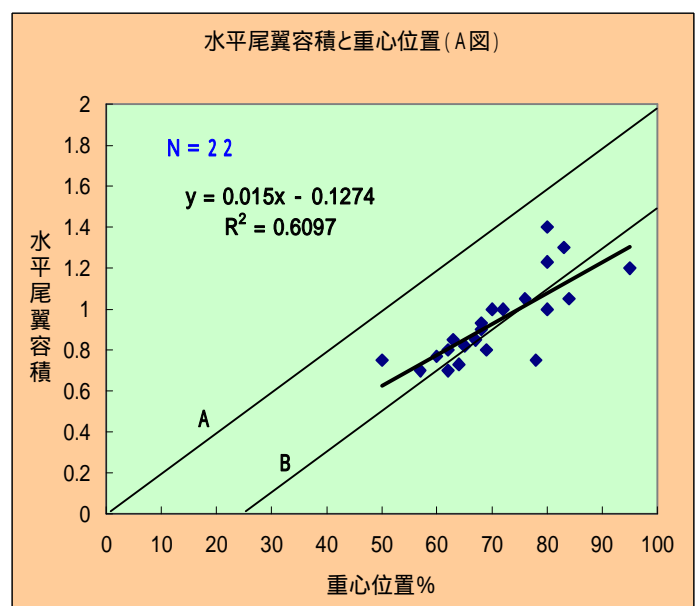


図6-5 重心位置と水平尾翼容積の関係



< 分析と推論 >

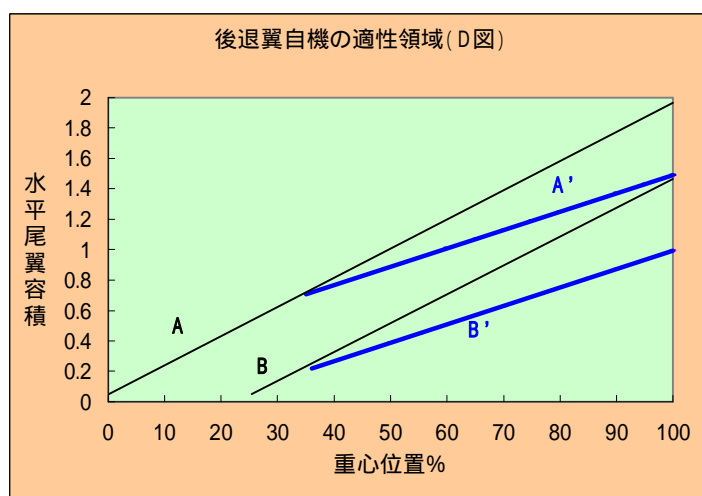
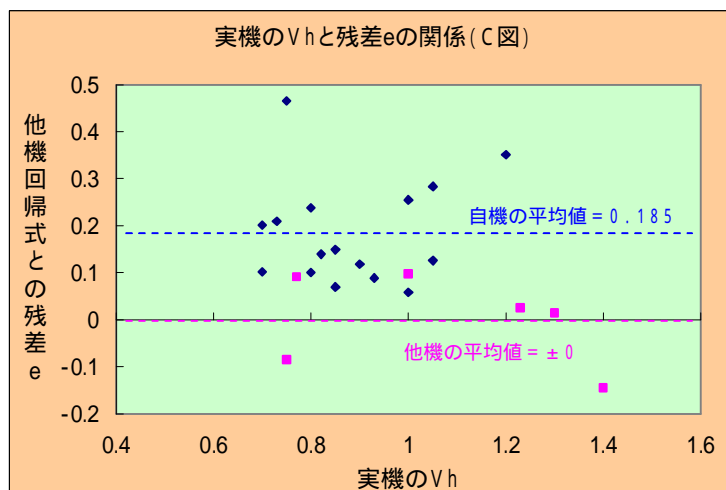
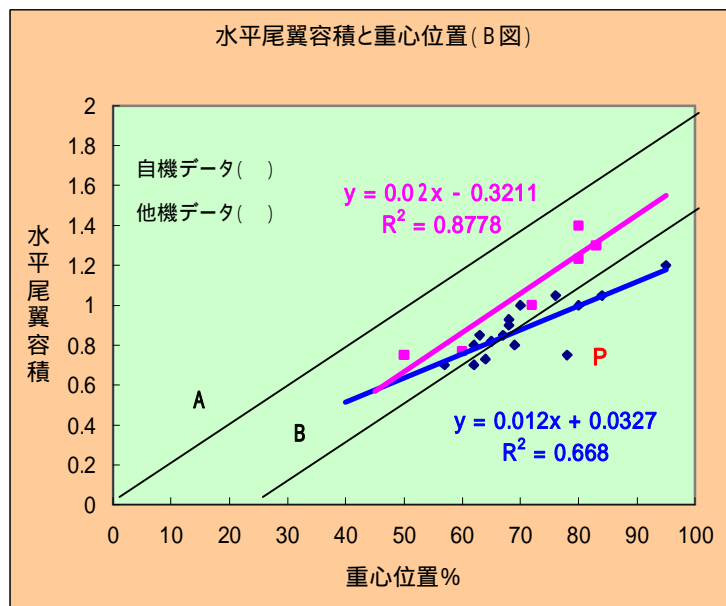
A 図をみると、相関係数 $R = 0.78$ で相関関係が認められ、図中の回帰直線周辺にデータが分布しているが、斜線 A 及び B に挟まれた適性領域から右肩上がりに外れている。即ち定説の適性領域と異なる領域の存在を暗示している。

そこで、再度自機と他機に層別して散布図を打ち直したのが右 B 図である。これをみると、他機はデータ数が少ないものの、相関係数は約 0.94 と高く、定説適性領域内に点在している。一方、自機は他機よりも勾配の小さな回帰直線周りに点在し、別の領域を形成していることが推測される。($R = 0.82$)

尚、他機の回帰式をもとに、自機及び他機データの当該回帰直線からの残差 e を算出し、 V_h との関係 layered にプロットしてみたのが C 図である。このグラフから、自機が他機に比して、 V_h が平均約 0.185 の差で回帰直線から隔たって分布し、かつ V_h が大きくなる程残差が大きくなっていることが読み取れる。

この平均値の差は、「2 標本による平均の検定 (Z 検定)」を用いて統計処理すると、信頼度 95% で有意差があり、自機と他機が母集団を異にするグループであることを裏付ける有力な手がかりとなる。

試みに自機のデータを用いて、自機回帰直線からの残差の標準偏差 () の ± 3 を上限 (A')・下限 (B') として、“自機の適性領域” をグラフ化してみたのが右の D 図である。(B 図中の点 P は、筆者が「大宮たんば記録会」で、60 秒 MAX、5 / 10 投げ、合計 287 秒の機体であるが、当初「異常値」に思えたこのデータも、新適性領域内にある。)



以上の分析から、自機が定説以外の適性領域を形成していると推定できるが、その理由は何か、又、それはあり得ることなのか。その存在の可能性について論及する必要がある。そこで、そも／＼“適性領域”がいかなる理論に基づいて設定されたのかという原点に立ち返ってみた。

< “適性領域”に関する考察 >

加藤寛一郎著「隠された飛行の秘術」(講談社)によれば、飛行可能な最後方重心位置 = h 、主翼の空力中心位置(前縁から約25%にある) = h_w 、翼玄長 = c 、主翼面積 = S_w 、水平尾翼面積 = S_h 、モーメントアーム = L_h とすると次の関係式が成り立つ。

$$h/c = h_w/c + S_h/(S_w + S_h) \times L_h/c \quad (\text{式1})$$

ここで h/c は、翼玄長で割った主翼前縁からの重心位置(即ち我々の言う「重心位置」に相当する)、 h_w/c は、主翼の空力中心位置を翼玄長で割った値 0.25 である。従って「式1」は次式に置き換えることができる。

$$h/c = 0.25 + S_h/(S_w + S_h) \times L_h/c \quad (\text{式2})$$

そこで $h/c = X$ 、 $S_h/S_w =$ とすると $S_h =$ S_w になるので「式2」に代入・移項すると

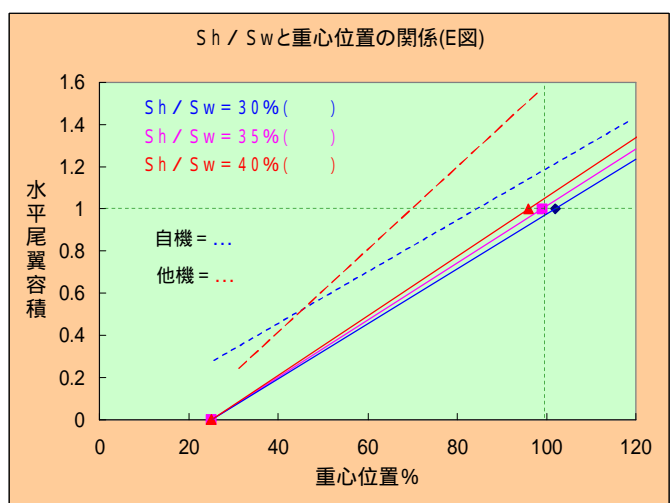
$$X - 0.25 = S_h/(1 +) S_w \times L_h/c$$

$$S_h/S_w \times L_h/c = V_h = (1 +) X - 0.25 \quad (\text{式3})$$

となる。これが水平尾翼容積 V_h と重心位置 X の一般式で、重心がこの直線より後方では迎角静安定(縦安定)が得られないことを示している。所謂“適性領域”の下限線は、この一般式を敷衍したものと考えられる。すると、水平尾翼面積対主翼面積比($S_h/S_w =$)が違えば、 V_h との間にそれに伴った一次関数関係が生じ、勾配を異にする下限線をもった適性領域が存在することになる。

例えば、 S_h/S_w の値が 0.35 の場合、 $V_h = 1.35X - 0.34$ という下限線が適用され、0.4 の場合は $V_h = 1.4X - 0.35$ が下限線になる。即ち、直線の勾配がそれぞれ 1.35、1.4 という異なる領域が形成されるのである。

紙ヒコーキやバルサ翼ヒコーキを設計する際、経験則から一般的には S_h/S_w は 0.3 ~ 0.4 前後を採用する。そこで、 S_h/S_w を 0.3、0.35、0.4 にした時の水平尾翼容積と重心位置との関係をシミュレーションし、重心軸をパーセント表示したものを右に掲げておく。実際には、水平尾翼容積が $S_h/S_w \times L_h/c$ であることから、 V_h 値と L_h/c 値との交互作用関係や、他の物理的要因が勾配を変化させているものと考えられる。



< 結論と総括 >

下表は、代表的な他機である石井機、河田機と、自機（林機）そして小林氏の前著の設計例として挙げられていた小林機を比較してみたものである。

機体	VH	Sh / Sw	Lh (mm)	C (mm)	Lh / C	備考
石井機	1.23	0.33	170	45.5	3.74	重心55%～80%
河田機	1.33	0.34	147	37.4	3.93	重心83%(図面)
林 機	1.07	0.35	119	39.0	3.05	重心80%(二機平均)
小林機	1.20	0.43	105	37.5	2.80	紙ヒコーキ、重心70%

表1：他機及び自機のVh及び関連比率の比較表

これをみると、VhやLh/cを大きく取っているのが他機であり、小林機は紙ヒコーキ特有の“ずんぐりむっくり”型である。他機とSh / Swをほぼ等しくして、Lh / c、特にモーメントアームが他機に比較して小さいのが自機の特徴である。一般的に、「モーメントアームを十分大きくとり、かつ水平尾翼容積をたっぷりとることが安定化対策」(教科書の書籍及び「石井式『スーパーPLG』の研究」)とされ、他機はそれを踏襲しているが、自機はその法則に当て嵌まっていない。

自機と他機の違いは、自機が「後退翼」であり、他機が後退角ゼロの「定常翼」であること。そして自機が、重心が後方に移動するに従い、定説の適性領域の下限線B以下に別の適性領域B'を有し、小林氏の前著で危険視された“ピッチング不安定”を起こさず、それなりに「よく飛んでいる」ことである。長年の実験の結果、自機ではVh = 0.9 ~ 1.0くらいが「よく飛び」、滞空性や正転性(所謂“かえり”の良さ)を考慮すると、Sh / Swは0.3 ~ 0.32前後が最適のようである。従ってLh / cも3.5以下に抑えている。こゝに後退翼機の特徴があり、結果として定説の適性領域外に別の領域を形成している所以であろう。

尚、周知の通り後退翼機は、優れた垂直上昇性を有し、又、翼自身が持つ所謂「上反角効果」によりローリング(横揺れ)に対する安定性を備えている。更に、「後退翼」は、上昇・正転後、速度エネルギーを効率よく揚力に変換させ、滑空態勢にスムーズに移行させる翼形であるように思われる。今後の研究を待ちたい。

< 今後の課題と継続実験 >

以上で自機・後退翼機には定常翼機と異なる適性領域があることを推究した。その適性領域はVh値が定常機に比して小さく、特にLh / cを小さく抑えてそれなりに「よく飛ぶ」ことを保証するものである。それは又アスペクト比同様に翼面荷重を軽減する効果もある。だがそのことが即、定常機より優れているとは断言できない。

筆者は先述した通り後退翼機を好み、その優秀性を疑わない者の一人である。先般「大宮たんぼ」で行われた競技会にも研究途上の後退翼機Pを引っさげて参加した。残念ながら第一回、第二回は60秒MAXをクリアしたが、機体を雨に濡らして以後成績が振るわず6位に終わった。今後更なる研究を続けて、多面的な角度からその優秀性を証明したいと思っている。その試みの第一歩として、数少ない実験で飛行性に影響する要因を大掴みすることができる「直交表」を用いた割付けによる実験を試みてみたい。以下概略のみ列記しておく。

1. 実験の目的

アスペクト比、テーパー比、 S_h/S_w 等をできるだけ一定にした後退翼機と定常翼機を設計し、両機の設計上に現れる特異性、飛翔パターンの相違性、特に飛行時間や安定性の優劣を定量的に調べる。

2. 実験因子の割付とデータの収集

「直交表」を用いて、例えば機体、 V_h 、気象条件の3因子・2水準を交互作用のない列に割付け(表2) 複数の投擲記録を採取・分析することにより、因子間の関係を大掴みする。

従来、紙ヒコーキの飛翔性については、「よく飛んだ」という定性的表現はあっても、競技会などで総合タイムを競う以外、実機体を用いた定量的なデータを以て機体や翼形の優劣を論ずることは希であった。設計が同一の機体であっても、製作上のバラツキがあり、飛翔時の気象条件が都度／＼変わるので無理からぬことではあった。今回は定量化のルールを決め、観測に必要な項目は綿密なチェックリストを事前に準備して記載の統一化を図り、重要な補足資料とする。etc

< 付記 >

最後に、本稿を纏めるに際し、「松戸ヒコーキクラブ」の会員諸氏の手を煩わしたことに深謝したい。

以上

< 添付資料 >

実験データ

	機体名	重心位置 %	水平尾翼 容積 V_h	後退角 度数	備考
1	MBW1612A	70	1	30	1611A, 1612改良
2	MBW1611	62	0.8	30	
3	MBW16093	69	0.8	25	
4	MBW16092	62	0.7	25	
5	MBW1602	63	0.85	30	
6	MBW1601A	68	0.9	30	
7	MBW1511改良	80	1	40	
8	MBW1508	64	0.73	35	
9	MBW1407C	68	0.93	30	03'7/20優勝機
10	テーパー翼1704A	76	1.05	30	
11	MYチビタ号	50	0.75		
12	PLG光2号	80	1.4		山田設計
13	PLGトレーナー	80	1.23		260ミリ
14	石井式前田機	60	0.77		
15	河田機H	83	1.3		3段翼
16	河田機K	72	1		小型PLGトレーナー
17	MBW1701	65	0.82	40	
18	MBW1702	95	1.2	30	
19	MBW1709	57	0.7	25	
20	MBW1709改良	67	0.85	25	B1改良、短ノーズ型
21	LBW1808B6	78	0.75	30	B6短ノーズ型
22	LBW1811	84	1.05	18	短ノーズ型

業図書) 「石井式『スーパーPLG』の研究」(石井英夫氏) 「垂直上昇期機の原理と設計」(枘岡秀昭氏) 「垂直上昇機における水平尾翼モーメントアーム伸長の試み」(浦部竜真氏) 他

表2: L8型直交表への割付例

	A	B	D	データ	
	機体	V_h	気象条件	1	2
1	定常翼機	1	風無し		
2	定常翼機	1	風有り		
3	定常翼機	1.2	風無し		
4	定常翼機	1.2	風有り		
5	後退翼機	1	風無し		
6	後退翼機	1	風有り		
7	後退翼機	1.2	風無し		
8	後退翼機	1.2	風有り		

実験に使用された機体の一部



(上が他機、下は自機)

主な参考及び引用文献

「紙ヒコーキで知る飛行の原理」

(小林昭夫著 講談社)

「隠された飛行の秘術」

(加藤寛一郎著 講談社)

「航空力学の基礎」(牧野光雄著 産