

上昇降下からのレベルオフ操作について — ビーチクラフト式A-36型機による考察 —

岩崎 幸弥

The control of leveling off from climb and descent
A study using by Beechcraft A-36

By
Yukiya IWASAKI

1. まえがき

飛行機の高度を変更させる場合、PILOTは機体の水平線に対する鉛直方向の姿勢（以下Pitch姿勢）とPowerを変更することにより、飛行機を所望の高度へ変化させる。所望の高度に接近した際、水平飛行時のPitch姿勢とPowerに戻すことにより高度変更を終了させる。（この操作をレベルオフ操作という。）この際、所望高度でレベルオフ操作を開始しても、飛行機の慣性力やレベルオフ操作の遅れ等の理由により、所望の高度で上昇降下を終了させることはできない。よって、ある見越しの量をとって所望の高度より手前でこの操作を開始する必要がある。この見越しの量をLEAD量と言う。一般的に上昇降下から水平飛行へ移行する際のLEAD量については、昇降率の1割と言われている。例えば、毎分500ftの上昇率で上昇している場合は、その1割である50ft手前からレベルオフ操作を開始するという事になる。

独立行政法人航空大学校の学生訓練実施要領（付属書第1）の空中操作の項にもレベルオフ操作について、上昇降下ともLEAD量は「約10%」という記述が存在する¹⁾。しかし、昇降率1割のLEAD量は、特に小型飛行機の上昇からのレベルオフにとって、

著者の経験上過大であると思われる。また、上昇と降下で同じLEAD量ということにも疑問がある。

「計器飛行 I -INSTRUMENT FLYING-」にあつては、上昇、降下共にレベルオフ時のLEAD量について、「見越し (lead) の大きさは上昇 (降下) 率やパイロット個人の技量によって異なる。」²⁾という記述が存在するのみであり、具体的な記述はなかった。以上より、LEAD量についてどう学生に指導すべきかという疑問が生じた。

過去の研究報告の中に上昇降下を扱ったものは存在したが、レベルオフ時のLEAD量について報告されたものは見あたらなかった。よって、ビーチクラフト式A-36型機を用いて、複数の被験者の経験的操縦感覚による上昇及び降下からの平均的なLEAD量についての考察を行い、今後の操縦教育に有効な資料となることを期待して本研究を行った。

2. 計 測

2-1 被験者の選択

被験者は独立行政法人航空大学校の実科教官で、500時間以上の飛行時間を有する教育証明保有操縦士6名を飛行経験に応じて抽出しアルファベットによって表示した。被験者Aの飛行時間は18,000時間、

被験者Bの飛行時間は16,000時間、被験者Cの飛行時間は7,300時間、被験者Dの飛行時間は6,000時間、被験者Eの飛行時間は1,200時間、被験者Fの飛行時間は700時間である。

2-2 飛行形態、速度及び昇降率

操縦訓練を含めた通常の飛行において、同一の飛行速度で上昇、降下からのレベルオフ操作を行うのは低速飛行訓練のみであることから、実験における飛行形態等を以下のように統一した。

形態は巡航形態（降着装置上げ、高揚力装置上げ、Cowl Flaps 閉）とし、上昇降下ともに、速度は90kts一定、又レベルオフ操作開始時の昇降率は500 fpm一定とした。なお、Propellerの回転数は計測中常に2,500RPMとした。

2-3 実験高度

上昇からのレベルオフは3,500feetで行い、降下からのレベルオフは3,000feetで実施した。限られた飛行時間の中で効率的に実験を行うために、上昇と降下で実験高度に500ftの差を設けた。なお、高度計は標準気圧値の29.92にセットした。

2-4 計測方法

今回の研究は被験者のもつ操縦感覚での最適なLEAD量を考察するものであることから、レベルオフ操作時に高度計の指示に合わせるコントロールをしないよう以下の工夫をした。上昇からのレベルオフにあっては、3,400ftから3,500ftの範囲内にある任意の高度で、又降下からのレベルオフにあっては3,100ftから3,000ftの範囲内にある任意の高度でレベルオフ操作を開始した。被験者にはレベルオフ操作開始時期を明示せず、「START」の合図と共にレベルオフ操作を開始した。その際高度計を見ることなく水平飛行のPitch姿勢とPowerに戻し、昇降

計の指示が「0」となり、高度計の指示が止まった時の高度を計測した。各被験者の平均的LEAD量を測定するために、上昇降下からのレベルオフ操作をそれぞれ9回実施した。STARTの合図に対する反応の違いについては、最大でも0.2秒程度であると考えられる。500fpmでの昇降に対して0.2秒の差は実測値に対して2 ft程度の誤差を生じるが、今回の考察に対してこの影響は大きくないと判断し、考慮しないこととした。

また、計測時の機体重量を計算するため、計測は離陸後30分経過した時点で開始した。なお、上昇降下の順番で計測しそれぞれの時間間隔を5分とした。

3. 計測結果

2-4の方法によって得られた結果をもとにして、上昇降下からのレベルオフ操作に要したLEAD量をまとめたものがそれぞれ表1及び表2である。

また、計測時2名の被験者（1名は左側操縦席、もう1名は後席）と測定者1名（右側操縦席）が搭乗していたが、どのレベルオフ操作においても、身体に異常な垂直方向の重力加速度の変化を感じた搭乗者はいなかった。

表1 上昇からのレベルオフ

被験者 A	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4212									
機体重量 (lbs)	3178	3178	3178	3163	3163	3163	3148	3148	3148	
重心位置 (inch)	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	
外気温度 (°C)	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	
実高度 (ft)	35	35	30	35	35	40	45	40	30	36.1
百分率 (%)	7.0	7.0	6.0	7.0	7.0	8.0	9.0	8.0	6.0	7.2

被験者 B	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4212									
機体重量 (lbs)	3363	3363	3363	3348	3348	3348	3333	3333	3333	
重心位置 (inch)	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	
外気温度 (°C)	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	
実高度 (ft)	35	45	30	35	35	30	35	35	40	35.6
百分率 (%)	7.0	9.0	6.0	7.0	7.0	6.0	7.0	7.0	8.0	7.1

被験者 C	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4212									
機体重量 (lbs)	3223	3223	3223	3208	3208	3208	3193	3193	3193	
重心位置 (inch)	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	
外気温度 (°C)	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	
実高度 (ft)	25	45	30	35	35	40	45	35	30	35.6
百分率 (%)	5.0	9.0	6.0	7.0	7.0	8.0	9.0	7.0	6.0	7.1

被験者 D	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4218									
機体重量 (lbs)	3403	3403	3403	3388	3388	3388	3373	3373	3373	
重心位置 (inch)	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	
外気温度 (°C)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
実高度 (ft)	15	25	30	35	35	40	25	25	40	30.0
百分率 (%)	3.0	5.0	6.0	7.0	7.0	8.0	5.0	5.0	8.0	6.0

被験者 E	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4218									
機体重量 (lbs)	3448	3448	3448	3433	3433	3433	3418	3418	3418	
重心位置 (inch)	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	
外気温度 (°C)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
実高度 (ft)	35	25	30	35	15	20	45	35	20	28.9
百分率 (%)	7.0	5.0	6.0	7.0	3.0	4.0	9.0	7.0	4.0	5.7

被験者 F	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4213									
機体重量 (lbs)	3386	3386	3386	3371	3371	3371	3356	3356	3356	
重心位置 (inch)	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	
外気温度 (°C)	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
実高度 (ft)	35	25	30	25	35	20	25	25	20	26.7
百分率 (%)	7.0	5.0	6.0	5.0	7.0	4.0	5.0	5.0	4.0	5.3

表2 降下からのレベルオフ

被験者 A	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4212									
機体重量 (lbs)	3171	3171	3171	3156	3156	3156	3141	3141	3141	
重心位置 (inch)	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	
外気温度 (℃)	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	
実高度 (ft)	45	35	40	45	45	40	35	55	30	41.1
百分率 (%)	9.0	7.0	8.0	9.0	9.0	8.0	7.0	11.0	6.0	8.2

被験者 B	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4212									
機体重量 (lbs)	3356	3356	3356	3341	3341	3341	3326	3326	3326	
重心位置 (inch)	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	
外気温度 (℃)	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	
実高度 (ft)	45	55	60	55	55	50	45	45	50	51.1
百分率 (%)	9.0	11.0	12.0	11.0	11.0	10.0	9.0	9.0	10.0	10.2

被験者 C	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4212									
機体重量 (lbs)	3216	3216	3216	3201	3201	3201	3186	3186	3186	
重心位置 (inch)	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	79.0	
外気温度 (℃)	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	
実高度 (ft)	55	45	50	35	55	60	45	45	50	48.9
百分率 (%)	11.0	9.0	10.0	7.0	11.0	12.0	9.0	9.0	10.0	9.8

被験者 D	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4218									
機体重量 (lbs)	3396	3396	3396	3381	3381	3381	3366	3366	3366	
重心位置 (inch)	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	81.3	
外気温度 (℃)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
実高度 (ft)	45	45	55	55	55	45	55	45	50	50.0
百分率 (%)	9.0	9.0	11.0	11.0	11.0	9.0	11.0	9.0	10.0	10.0

被験者 E	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4218									
機体重量 (lbs)	3441	3441	3441	3426	3426	3426	3411	3411	3411	
重心位置 (inch)	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	
外気温度 (℃)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
実高度 (ft)	55	45	50	55	55	50	45	45	60	51.1
百分率 (%)	11.0	9.0	10.0	11.0	11.0	10.0	9.0	9.0	12.0	10.2

被験者 F	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	平均
使用機体	JA4213									
機体重量 (lbs)	3379	3379	3379	3364	3364	3364	3349	3349	3349	
重心位置 (inch)	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	
外気温度 (℃)	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
実高度 (ft)	45	65	60	45	45	40	65	55	50	52.2
百分率 (%)	9.0	13.0	12.0	9.0	9.0	8.0	13.0	11.0	10.0	10.4

4. 考 察

4-1 上昇からのレベルオフ操作に必要なLEAD量についての考察

上昇からのレベルオフ操作についての測定結果を被験者の飛行時間毎にまとめたものが表3である。表3のデータから、縦軸に「レベルオフ操作に要した実高度及び上昇率との百分率」、横軸に「被験者の飛行時間」をとってグラフにしたのが図1である。

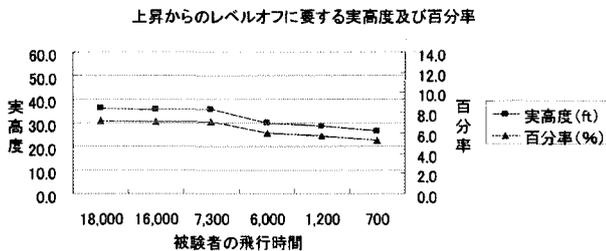
この図より、上昇からのレベルオフ操作についての必要なLEAD量は最大でも40ft以下であり、ある程度のばらつきは見られるものの大凡一定の範囲内にあることが見てとれる。平均値は表3より32.2ftである。

また、上昇からのレベルオフ操作についての必要なLEAD量の上昇率に対する百分率は、最大でも8%以下であり、ある程度のばらつきは見られるものの大凡一定の範囲内にあることが見てとれる。平均値は表3より6.4%である。

表3 被験者の飛行時間による上昇に要した実高度及び百分率

飛行時間	18,000	16,000	7,300	6,000	1,200	700	平均
実高度 (ft)	36.1	35.6	35.6	30.0	28.9	26.7	32.2
百分率 (%)	7.2	7.1	7.1	6.0	5.7	5.3	6.4

図1 上昇からのレベルオフに要する実高度及び百分率



4-2 降下からのレベルオフ操作に必要なLEAD量についての考察

降下からのレベルオフ操作についての測定結果をまとめたものが表4である。表4のデータから、縦軸に「レベルオフ操作に要した実高度及び降下率との百分率」、横軸に「被験者の飛行時間」をとってグラフにしたのが図2である。

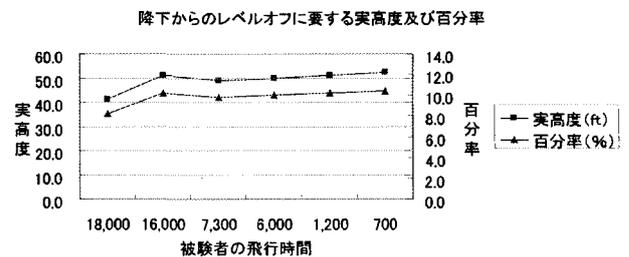
この図より、降下からのレベルオフ操作についての必要なLEAD量は最大では50ft以上となり、ある程度のばらつきは見られるものの大凡一定の範囲内にあることが見てとれる。平均値は表4より49.1ftである。

また、降下からのレベルオフ操作についての必要なLEAD量の降下率に対する百分率は、最大では10%以上となり、ある程度のばらつきは見られるものの大凡一定の範囲内にあることが見てとれる。平均値は表4より9.8%である。

表4 被験者の飛行時間による降下に要した実高度及び百分率

飛行時間	18,000	16,000	7,300	6,000	1,200	700	平均
実高度 (ft)	41.1	51.1	48.9	50.0	51.1	52.2	49.1
百分率 (%)	8.2	10.2	9.8	10.0	10.2	10.4	9.8

図2 降下からのレベルオフに要する実高度及び百分率



4-3 被験者各人の上昇からのLEAD量と降下からのLEAD量についての考察

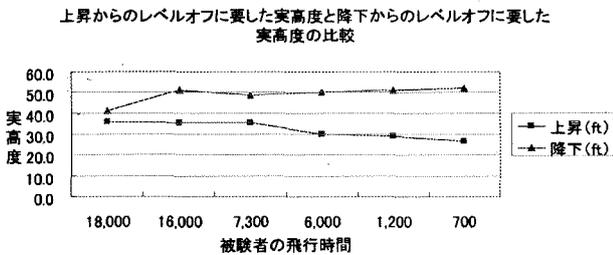
被験者を飛行時間別に表示して、上昇からのレベルオフに要するLEAD量と降下からのレベルオフに要するLEAD量を比較できるようにしたのが表5であり、それをもとにして縦軸に「レベルオフ操作に要した実高度」、横軸に「被験者の飛行時間」としてグラフにしたのが図3である。

この図より、どの被験者にとっても上昇からのレベルオフ操作に必要なLEAD量は、降下からのレベルオフ操作に必要なLEAD量より常に小さいということが判る。

表5 被験者の飛行時間による上昇及び降下に要した実高度の比較

飛行時間	18,000	16,000	7,300	6,000	1,200	700
上昇 (ft)	36.1	35.6	35.6	30.0	28.9	26.7
降下 (ft)	41.1	51.1	48.9	50.0	51.1	52.2

図3 上昇からのレベルオフに要した実高度と降下からのレベルオフに要した実高度の比較



これについての考察を進めてみる。飛行中の飛行機には通常揚力 (L)、重力 (W)、推力 (T)、抗力 (D) の4つの力が作用している。レベルオフの際には、これに加えて遠心力が作用する。レベルオフ時の飛行経路を半径Rの円弧とすると、この場合の遠心力は $(W/g)(V^2/R)$ という式で表される。

また、飛行機の飛行経路と水平線のなす角を γ ラジアンとすると、水平飛行状態では $\gamma = 0$ となる。

測定時の外気温度を用いて航法計算盤により真対気速度を算出すると、外気温度 -5°C の時が今回の実験では最小の91.8kts、外気温度 -3°C の時が92.0kts、外気温度 -1°C の時が今回の実験では最大の92.2ktsとなる。よって、平均をとって真対気速度を92ktsとして考察をすすめる。昇降率500fpmから、この上昇降下における γ の値は下記式により算出できる。1ktが1時間に1ノータカルマイル (海里) 進む速度であり、また1ノータカルマイル (海里) が6,076ftsであることから、

$$92\text{kts} = 92 \times 6,076 \div 60 = 9,316.5333\text{fpm}$$

底辺の長さが9,316.5333ftで高さが500ftの三角形を想定し、

斜辺の長さをXとすると、Xはピタゴラスの定理により、

$$X^2 = 9,316.5333^2 + 500^2$$

この式より $X = 9,329.9407$ と算出される。これにより

$$\cos \gamma = 9,316.5333 / 9,329.9407 = 0.9985629$$

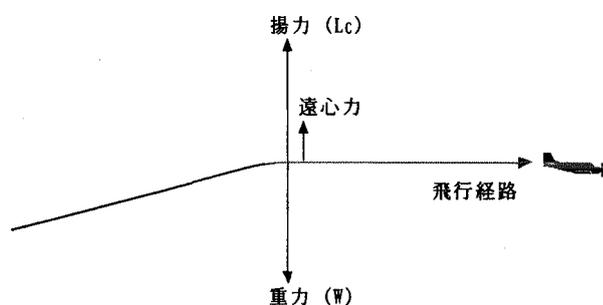
となる。

よって、近似的に $\cos \gamma = 1$ 、即ち $\gamma = 0$ として扱うことができる。これにより揚力、抗力を常に鉛直方向に作用すると仮定して考察をすすめる。

図4のとおり上昇からのレベルオフ操作時には、この遠心力が上方に作用する。即ち重力と反対方向へ作用するので、揚力を水平飛行状態よりも小さくすることができる。この場合の飛行経路の半径を R_c 、上昇飛行からのレベルオフ操作中の飛行機に作用する揚力を L_c とすると、上昇飛行からのレベルオフ操作時における鉛直方向の力の釣り合いについては以下の式で表すことができる。

$$L_c + (W/g)(V^2/R_c) = W \quad \dots \quad \text{①}$$

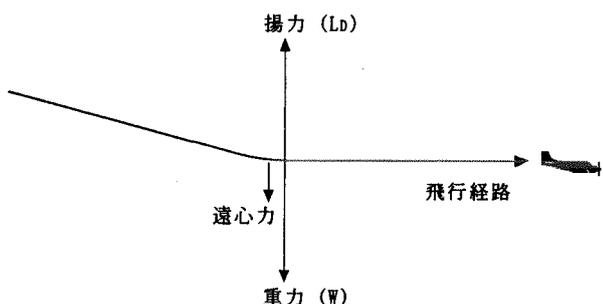
図4 上昇からのレベルオフ



逆に図5のとおり降下からのレベルオフ操作時には、この遠心力が下方に作用する。即ち重力と同方向へ作用するので、揚力を水平飛行状態よりも大きくしなければならない。この場合の飛行経路の半径を R_D 、降下飛行からのレベルオフ操作中の飛行機に作用する揚力を L_D とすると、降下飛行からのレベルオフ操作時における鉛直方向の力の釣り合いについては以下の式で表すことができる。

$$L_D = W + (W/g)(V^2/R_D) \dots\dots ②$$

図5 降下からのレベルオフ



①、②の式より W を一定とすると

$$L_c + (W/g)(V^2/R_c) = L_D - (W/g)(V^2/R_D) \dots\dots ③$$

という関係式が成り立つ。

③式を変形すると、

$$L_c = L_D - (W/g)(V^2/R_D + V^2/R_c) \dots ④$$

よって $L_c < L_D$ である。

この式により同じレベルオフ操作であっても、上

昇からのレベルオフ操作の際に機体に働く揚力は、降下からのレベルオフ操作時に機体に働く揚力に比べて小さいという事が言える。この揚力差より、必要となるLEAD量に違いがでるものと考察される³⁾。

5. まとめ

- 1) 上昇からのレベルオフにおけるLEAD量と、降下からのレベルオフにおけるLEAD量については分けて考えるべきである。
- 2) 各被験者に共通して、降下からのLEAD量に比べて、上昇からのLEAD量は少なくても良いという結果がでた。
- 3) 上昇からのレベルオフについては上昇率の約5～7%が望ましく、降下からのレベルオフについては降下率の8～10%が望ましいと考えられる。
- 4) 今回は定速におけるレベルオフについての考察のみ行ったが、増速レベルオフ又は減速レベルオフについての考察、また、低速度領域、高速度領域における考察、上昇降下率の違いによる考察等についても研究を続ける事が、今後の課題であると感じられた。

最後に本研究をまとめるために必要なDATAの取得に協力頂いた独立行政法人航空大学校帯広分校の実科教官の方々にこの場を借りて感謝の意を表します。

参考文献一覧

- 1) 「学生訓練実施要領 5-(4)頁 航空大学校」
- 2) 「計器飛行 I —INSTRUMENT FLYING— I-36頁、I-39頁 鳳文書林」
- 3) 「比良二郎著 航空力学の問題と解答 4-2頁から4-5頁及び4-45頁から4-48頁 鳳文書林」