

3E17 パイロットの昇降舵による高度制御に必要な飛行情報について (大型機移行訓練の効率化)

○上村常治 (東大航空)、ヨルグ・オノ・エントジンガー (東京大学)、森亮太 (電子航法研究所)、
松永 大一郎 (東京大学)、鈴木真二 (東京大学)

On Information Requirement for a Pilot's Altitude Control using Elevator.
(For more Effective Bridge Training)

Tsuneharu UEMURA (Univ. of Tokyo), Jorg Onno ENTZINGER (Univ. of Tokyo), Ryota MORI(ENRI),
Daiichirou MATSUNAGA (Univ. of Tokyo), Shinji SUZUKI (Univ. of Tokyo)

Key Words: Altitude Control, Elevator, Pilot, Phase Margin, Bridge Training

Abstract

One of the basic flight maneuvers is to keep a certain altitude by elevator control using the cockpit display. With my 40 years of flight experience, I could maintain altitude using elevator without any question. However, recently I realized the lack of 'Phase Margin' between elevator and altitude control, from a feedback control theoretical analysis.

Then I found there exists a difference in flight control method and use of cockpit display between big jets and small planes. This knowledge will help flight training, especially 'Bridge Training' which Pilots receive when transitioning from small to big aircraft.

1. はじめに

パイロットは日々、昇降舵で、高度制御を行っている。筆者は40年間に渡り、そのことに何の疑問も持たないで、操縦していた。ところが、昇降舵による、高度制御の位相差を解析すると、フィードバック制御では位相余裕が無いことに気が付いた。そこで、パイロットはどの様にして、高度制御を行っているか、考察した。検証の結果、小型機と大型機の反応の違いに起因する、操縦手法の違いが解った。この違いに注目すれば、小型機から大型機への移行訓練がより効率的に行えるものと、期待している。



図-1 フライトシュミレータ 全景

2. 実験装置

鈴木・土屋研で研究用に開発した飛行プログラムで動作している固定席フライトシュミレータ (以後 SIM と記す) である。今回はこの SIM を使用し、B747-400 と D228 (ドルニエ) の数値モデルで、比較実験した。図-1 にその全景を示す。

3. 解析手法

3.1 計算の流れ

各種の時系列記録に周期依存窓・短時間フーリエ変換を行い、各時刻、周期 (周波数) 毎に実部と虚部の成分を取り出した。その成分により、大きさと、角度を計算した。大きさは、パワースペクトログラム
ム
示
図

解析の手法

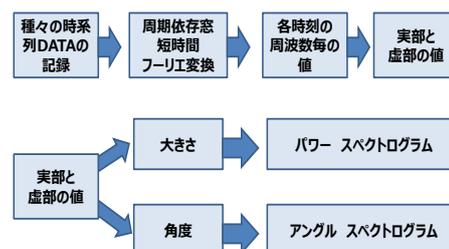


図-2 計算の流れ

位相差 スペクトログラム

3.2 周期依存窓・短時間フーリエ変換について

窓区間の大きさで、周波数や時刻の精度が影響を受けて、精度が落ちる。それを避ける為に、各周期に応じてその周期の2倍の区間窓と設定し、計算に用いた。

3.3 角度と色の関係

角度は、全周 360 度を角度に応じ赤緑青 (RGB) 色で表すことにした。角度と色の関係を図-3 で示す。

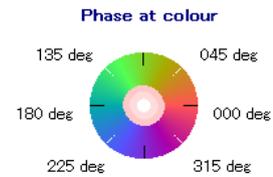


図-3 角度と色の関係

3.4 計算例

計算された、パワースペクトログラムと、アングルスペクトログラムの計算例を図-4 に示す。昇降舵

各計算結果の例

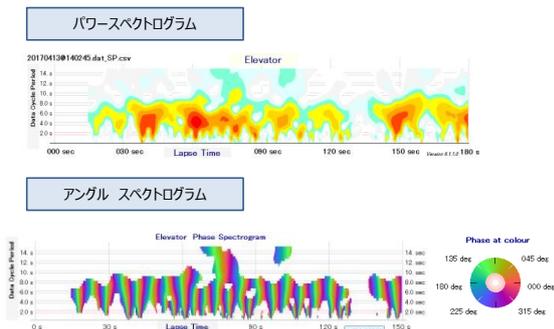


図-4 計算例

アングルスペクトログラムは計算された信号の強度が、あまりにも小さいところは、計算の精度確保の為に、削除している。

3.5 位相差スペクトログラム

そこで、異なる、二つの信号の角度を時刻・周期(周波数)毎に差をとると、位相差スペクトログラムが作成される。図-5 はその例である。ここでは昇降舵とピッチ角の位相差スペクトログラムである。実は位相差スペクトログラムは、ボード線図の位相と実質同じものである。

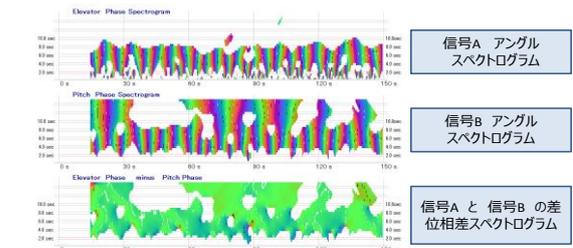


図-5 位相差スペクトログラム

3.6 位相フローチャート

3.6.1 位相の変化

上記手法を用い、各時系列データの位相差を求めることができるので、昇降舵から高度に至る、位相差の流れを追うことが可能となった。

昇降舵は操作されると…
 ピッチモーメントを生じ…
 モーメントはピッチ角加速度を生じ…
 ピッチ角加速度は積分されて、ピッチ速度を生じ…
 ピッチ速度は積分されてピッチ角を変化させる。

ピッチ角が変化すると…
 揚力の変化を生じ…
 揚力の変化は上下加速度の変化を生じ…
 加速度は積分されて、上下速度の変化を生じ…
 上下速度は積分されて、高度変化となる。

その流れを、図-6 で示した。



図-6 位相変化の流れ

3.6.2 位相の先行と遅れ

位相の変化は説明された手法で計算されるので、その中で位相の先行と遅れが計測される。積分は一回につき 90 度の位相遅れとなる。昇降舵によるモーメント変化とピッチ角加速度の間とピッチ角度変化による揚力変化と上下加速度の間では、位相の先行を生じる。その先行量は機種によって異なる。

例として、B744 の、昇降舵とピッチ角加速度の間の位相の先行量を図-7 で示す。

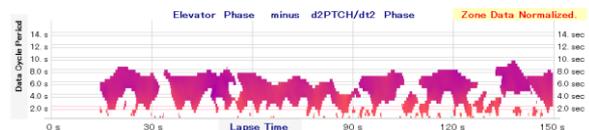


図-7 昇降舵とピッチ角加速度間の位相先行量

5.5 昇降舵と上下速度の位相差

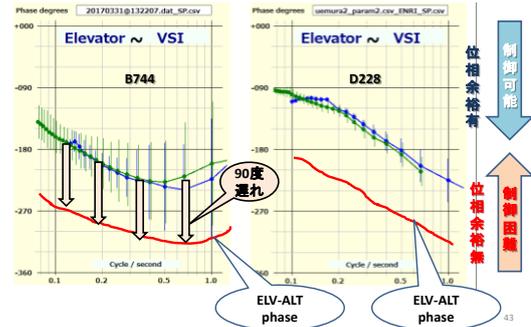


図-10 昇降舵-VS（上下速度）の位相差（D228 と B744）

3.6.3 位相フローチャート作成

4.1 昇降舵→高度への位相差の関係

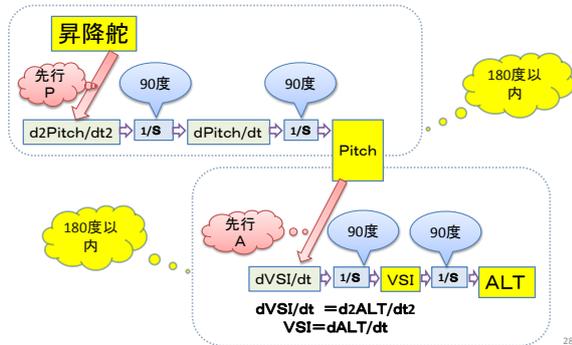


図-8 昇降舵から、高度への位相フローチャート

4. 昇降舵による高度制御

4.1 昇降舵操舵と高度変化の位相差

SIMを用いて実験し飛行記録を解析した。D-228 と B-744 の計算された位相差スペクトログラムを図-9 に示す。飛行記録から計算された、位相遅れは操舵周期（周波数）に依存して変化する。B744 は、昇降舵操舵と VS（高度変化、以下 VS と記すその表示値は以下 VSI と記す）は 180 度を超え、位相余裕はないと判断される。D228 は、操舵周期によって位相余裕は確保されている。

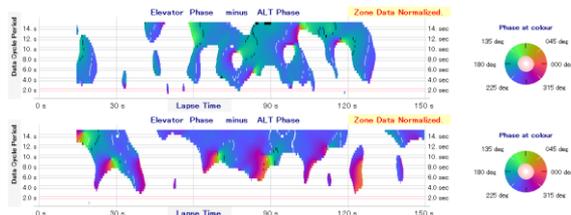


図-9 昇降舵と高度の位相差（D228 と B744）

4.2 昇降舵と上下速度の位相差

図-9 で着色した位相差で、大まかな位相差は判るが、より詳細な昇降舵と VS のボード線図を図-10 で示す

B744 では昇降舵による上下速度制御には位相余裕がほぼないが、D228 は、操舵周期が通常の操舵周期範囲内であれば十分に位相余裕がある。

高度は上下速度の時間による積分なので、位相はさらに 90 度遅行する。その位相遅れを、図-9 の中で赤い線で示す。どちらも、位相余裕はない。この関係を表-1 に示す。

5.7 異機種間での操舵の違い

昇降舵制御	操舵周期	B744 SIM	D228 SIM
ピッチ角 PITCH	遅い	○	○
	普通	○	○
	早い	○	○
垂直速度 VSI	遅い	△	○
	普通	×	○
	早い	×	△
高度 ALT	遅い	×	×
	普通	×	×
	早い	×	×

○：できる。 △：何とかできる。 ×：操縦困難

この表から判るように、両機種とも、昇降舵で高度を制御するには、位相余裕は無い。昇降舵と上下速度の間で、D228 には位相余裕はあるが、B744 では通常の操舵周期では位相余裕は無い。大型機では応答の遅れが大きいためと考えられる。

4.3 昇降舵による高度制御の仮説

そこで、航空機は昇降舵で媒介情報であるピッチ角を制御して、その後ピッチ角で高度を制御しているとの仮説を建てた。D228 はさらに、VSI も媒介情報として、使用可能である。つまり、B744 はピッチ角情報が無ければ、高度制御に困難が生じる。D228 はそれに加え VSI 情報が無ければ、高度制御に困難となる。

5. 実験

5.1 実験条件

通常の運行状況を想定し、標準大気状態で無風、高度、速度を指定し、バランス推力（加速=ゼロ）、バランスピッチ、上下速度=ゼロ、昇降舵=トリム状態（手放し飛行可能状態）として、飛行を開始する。表-2 に内容を示す。

表 2 実験開始条件

機種	B744	D228
飛行重量	540000 ポンド	12125 ポンド
FLAP	10 度	20 度
指定高度	2000 フィート	1000 フィート
速度	180 ノット	100 ノット

科目 : 昇降舵操舵による、指定高度保持
 推力 : 推力値は初期状態で、位置を固定

5.2 ピッチ角情報の有無が飛行に与える影響

B744 と D228 で共にピッチ角情報が得られない時に昇降舵で高度保持制御が可能か調べた。

5.2a B744 でピッチ角情報が使える場合

図-11 は、その時の B744 の昇降舵操舵のスペクトログラムである。操舵周期は認められて、操縦が行われている事を示唆する。その時の高度保持の標準偏差は 9.2feet であった。

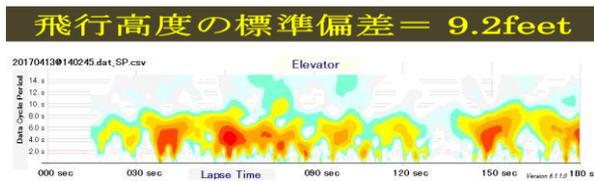


図-11 B744 ピッチ角情報が使える場合

5.2b B744 でピッチ角情報が無い時

図-12 は、その時の B744 の昇降舵操舵のスペクトログラムである。操舵周期は一定しない。やみくもな操縦と思われる。この時の高度保持の標準偏差は 172.3feet であった

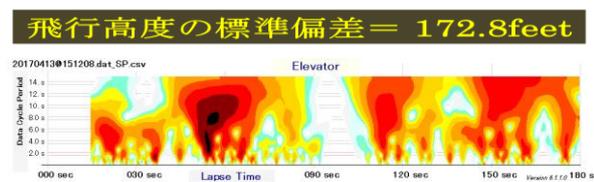


図-12 B744 ピッチ角情報が使えない場合

5.2c D228 でピッチ角情報が使える場合

図-13 は、その時の D228 の昇降舵操舵のスペクトログラムである。操舵周期は認められて、操縦が行われている。その時の高度保持の標準偏差は 23.3feet である。

操舵周期のスペクトログラム解析と飛行経験については参考文献 1) 2) で発表している。

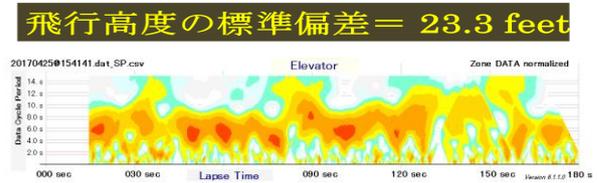


図-13 D228 ピッチ角情報が使える場合

5.2d D228 でピッチ角情報が無い場合

図-14 は、その時の D228 の昇降舵操舵のスペクトログラムである。操舵周期は認められて、操縦が行われている。その時の高度保持の標準偏差は 10.5feet である。この時 VSI 情報が使えた。

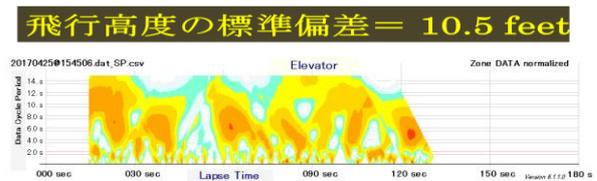


図-14 D228 ピッチ角情報が使えない場合

5.3 D228 でピッチ角と VSI が同時に使えない場合

図-15 は、その時の飛行記録の解析である。最初は高度保持が上手く行って、仮説が成立しないと思われた。そこで、長時間実験を行ってみると、やはり不安定となり、高度保持は出来なくなった。高度保持の標準偏差は 64.3feet であるが、前半は高度保持区間が後半の乱れを緩和しているので、現実的にその高度偏差値はもっと大きい。高度保持は出来な

7.4 実験・Pitch&VSI 情報無しで、昇降舵の高度制御(D228)

飛行高度の標準偏差 = 64.3 feet

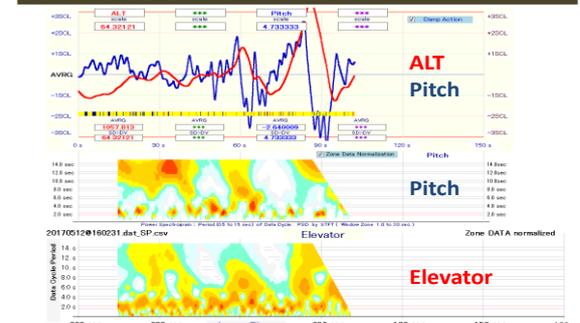


図-15 D228 ピッチ角と VSI が無い場合
 飛行高度の標準偏差 = 64.3 feet

6. 終りに

6.1 結論

実験から表-1 と同じ結果が得られた。仮説は正しいと判断した。

6.2 先人の知恵

航空機操縦時のピッチ角への注意配分の大切さについて、先輩から、繰り返しも伝えられる。先人は位相余裕についても、位相先行についても、言葉に出すことはなかったが、長年の経験から学んだピッチ情報の重要性を認識し、後輩に伝承してきた。

先人の経験から獲得した知恵に、感心し、操縦の本質にすこし、近づけたと喜んでいる。

6.3 期待する応用

幾つかの航空会社では、小型機から大型機に移行する操縦士には、ブリッジ訓練と呼ばれる、付加訓練がある。大型機の操縦特性に慣熟させるのが目的である。

もし、小型機操縦で高度制御に過度の VSI 計器に依存していたら、その手法は大型機に使えないことになる。ここで、明らかにしたように、大型機と小型機では、操縦手法が異なっている。

この事を踏まえて、機種移行訓練を行えば、効率的な訓練となる事を期待している。

6.4 更なる考察すべき事象 (Seat of Pants)

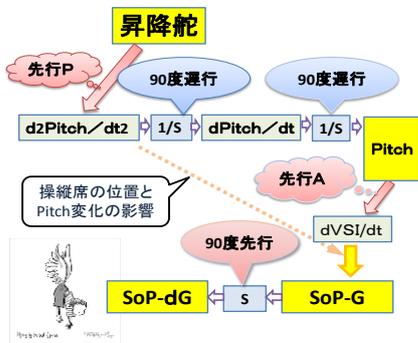
航空機操縦には Seat of Pants と呼ばれる、体感する加速度やその変化も用いられる。此处ではそれは考察されていない。将来の課題としている。(図-16)

- 、 SoP-G : 対感垂直加速度
- 、 SoP-dG : 対感垂直加速度の微分値
- 、
- 、

7. 参考文献

- 1) 上村常治, 鈴木真二, ヨルグ・オノ・エントジナー, 森 亮太, 松永大一郎「航空機最終進入時の操縦操作を、経験差で比較する」、第 51 回飛行機シンポジウム、2009、2013-11
- 2) 上村常治, 鈴木真二, ヨルグ・オノ・エントジナー, 森 亮太, 松永大一郎「フライトシミュレータによる航空機操縦技量解析手法の研究」、日本機械学会 第 24 回交通・物流部門大会、1302、2015-12

8-1 これからの課題



計器に因らない、飛行情報に Seat of Pants がある。

これは、Pilotが体感で入手する、飛行情報である。

この部分も、解明したい部分である。

図 -16 Seat of Pants への位相フローチャート