

1302

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

上村常治^{*1}、鈴木真二^{*2}、森亮太^{*3}、エントジンガー ヨルグ^{*2}、松永 大一郎^{*2}

Research on Pilot Control Technique Using Flight Simulator

Tsuneharu UEMURA^{*1}, Shinji SUZUKI^{*2}, Ryota MORI^{*3}, Jorg O. ENTZINGER^{*2}
and Daiichiro MATSUNAGA^{*2}

^{*1}Center for Aviation Innovation Research, The Univ. of Tokyo

^{*2}Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, The Univ. of Tokyo

^{*3}Electronic Navigation Research Institute

We analyze pilot flight technique using the fixed base flight simulator of the Suzuki-Tsuchiya laboratory at The University of Tokyo. We look at pitch control style and input frequencies in particular, and identified differences between professional pilots and students without prior flight experience. Also students with a lot of experience playing the Microsoft Flight Simulator game show a typical control style. In addition we can distinguish control styles between instrument flight and visual flight.

We provided simulator training to a number of students and followed them over a period of a few months. The analysis of their data shows that their control input frequency increases, and resembles the professional pilot's control style more and more. In addition, we found trainees develop a characteristic change in the pupil diameter just before landing comparable with professional pilots. We believe these findings are an important step towards the objective evaluation of trainee pilots.

Key Words : Flight technique, Human Pilot, Control style, Flight training, Pitch

1. 緒 言

東京大学大学院工学系研究科、鈴木・土屋研究室のフライトシミュレータを使用して、パイロット 操縦解析手法を研究している。飛行記録をスペクトル解析してみると、ベテラン (操縦免許保持者) と初心者 (学部学生) では昇降舵とピッチの動きに、違いが見てとれた。同様に計器飛行と有視界飛行、また PC ソフトの MS フライトシミュレーター経験者 (大学生) にも特有の違いがみてとれる。そこには、操舵周期や、操舵の質にも、違いがある。大学生を数カ月練習させたところ、その操舵方法 (操舵周期) がベテランに近づいた。

パイロットにとって、着陸は、最も習得に時間がかかる、操縦技量である。接地操作中は変化する様々な飛行情報を、視覚を用いて、タイムリーに取得しなければならない。そこで、着陸操作時の瞳孔のサイズを計測し、その動きの傾向を調べた。プロのパイロットは接地操作時に、瞳孔が大きくなる。新人にはその傾向は無い。しかし例外もあった。初心者でありながら、ベテランと同様の瞳孔変化傾向を示した、学部学生

^{*1} 航空イノベーション総括寄付講座 (文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部 7 号館)

^{*2} 東京大学 (文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部 7 号館)

^{*3} 国立研究開発法人電子航法研究所 (東京都調布市深大寺東町 7-42-23)

がいた。この現象は、パイロット採用時の操縦適性検査や、訓練中の訓練生の進度の指標として使える可能性を感じる。

この研究が、人間パイロットの操縦技術の解明と、将来の航空安全に繋がれば、幸いである。

2. 実験環境とその背景

2.1 実験環境一般

現役の大型旅客機の操縦士（747-400、B-777、B737、B767、E170）、退職した操縦士、航空学科の学生等が参加した。



図1 使用した鈴木・土屋研究室のフライトシミュレータ

図1、鈴木・土屋研究室のフライトシミュレータ。研究室で開発した飛行 program で動かしている。飛行特性や表示計器は B747-400 を模している。

計測条件：高度は 2000feet もしくは 1800feet から接地まで。飛行重量は 520000 ポンド。フラップは 30 度。目標速度は $V_{ref}+5kt$ （進入速度、この場合 150kt）無風で標準気温である。開始位置は 3 度の降下経路上である。

2.2 実験の背景、着陸操作とはどういうものか（瞳孔径の変化）

着陸操作は、航空機の操縦操作でもっとも、技量獲得が難しい分野で、パイロットの操縦技量を計る目安となっている。いわば “腕の見せ所” である。

通常、航空機は対地降下経路角度マイナス 3 度で滑走路に接近する。着陸操作はそのマイナス 3 度をマイナス 1 度に変化させて、滑走路の所定の場所に衝突させる行為である。地面に近づく速度を降下率と言う。

進入時の降下率は毎分 600～800 フィートである。（その時の対地速度で異なる）
そこで、接地時の降下率が毎分 200～250 フィートが良いとされている。

ここで、一般的な降下率と着陸の評価について述べる。

毎分100フィート以下は、グリース着陸と呼ばれる。一般的には無ショック着陸であるが、多くの場合、接地点が伸びて、制動に使える滑走路長が短くなり、好ましくないと判断される。

接地点が伸びない場合は、単なる幸運でしかない。

毎分100～200フィートで、接地点が伸びなければ、ベリーナイス着陸と判断される。

毎分200～300フィートで接地するなら、通常のナイス着陸、軽いショックがある。

毎分300フィートを超えると、ファーム着陸となる。乗客はすこし強めの接地ショックを感じる。

毎分400フィートを超えると乗客は固めの着陸と感じる。

それ以上は・・・思い出に残る着陸となる。

さらに、接地のショックだけでなく、接地点の前後左右の位置も重要な評価基準となる。

着陸操作で、パイロットは、降下経路角度・降下率を変化させる変化の為に、機首上げ操作（フレアーと呼ばれる）を行う。

適正な降下率、飛行経路角（マイナス1度）を遂行する為に、昇降舵が操作される。その操舵速度や操舵量や経過時間は、その時の風や、設定されている発動機推力、その他に、機体指示速度、その速度の変化率、風速の変化率（高度や時刻で変化する）、航空機の数値安定の特性（トリム設定状態と機首動きの変化率）操作開始高度・・・等、多くの要因から決定される。

さらに、操舵周期2秒なら、このシミュレータは昇降舵を操作して実際に機首が動くのに約1秒経過する。（周期2秒で180度遅れると1秒経過する）人間の状況認識・判断・操作開始までの時間がそれに加わる。

それら、諸々の要因が、着陸技量取得を困難にしていると考えられる。

多種の飛行情報の取得が必要な時期である接地直前は、飛行情報は計器から取得されるもの他に、滑走路を視認して得られるものが必要となる。航空機の降下率を、滑走路と近づく速さとして、パイロットは視覚で判断出来る。また、接地点の前後左右のずれも、外界の視認で得られる。機体の姿勢や、風に流される量も把握できる。

それゆえ、接地直前のプロの操縦士の瞳孔径の増大が計測されると、理解している。

3. 解析手法

3.1 昇降舵操作のスペクトログラム解析

スペクトログラム解析には短時間フーリエ変換（short-term Fourier transform STFT）を使用し、ある特定の時刻でパワースペクトルを計算した。そしてその強度に対応して色付けした。強度が強いほど色が濃い。周期は0.5秒から10秒までを0.5秒刻みで計算した。精度向上の為に、DATAの区間は計算する周期の2倍の区間（窓）を確保して計算した。サイン窓を使用した。右端は操舵の量と周期をグラフにしたものである。

3.2 Damping action 解析

Damping action は、筆者達が勝手に名付けた指標で、Pitchが上昇中にPitch downの操舵をした時と、Pitchが下降中にPitch up操舵をした時を、オレンジと青でバーコードの様に表現した横長のグラフで、Pitchの制動操舵状態を表現している。黄色はそれ以外の状態である。横軸は経過時間である。

3.3 瞳孔の解析

瞳孔の大きさを時系列に並べて、グラフとした。上段は右目（赤色）と左目（青色）の瞳孔のサイズの変化で、中心は平均値、上下メモリ幅は標準偏差値を使用している。右端にその時の平均値と標準偏差値が書かれている。0～150秒の計測である。右端で接地している。その上下の同色の縦のバーコードは計測欠損を意味する。短時間での計測欠損は瞬きも含んでいる。

4. 解析結果

4.1 Pitchの動きの違い（ベテランと初心者）



図 2a ベテランのPitchの動き

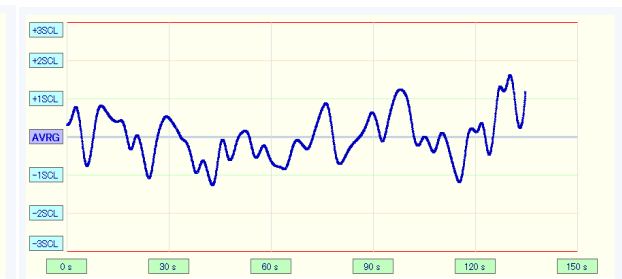


図 2b 初心者のPitchの動き

図 2a, b は、着陸の為の最終進入時のPitchの時間経過のグラフである。横軸が経過時間で縦軸は操舵量である。中央のAVRGは測定されたPitchの平均値で、縦軸の目盛（SCL）は標準偏差値を用いている。それで、動きの絶対量は初心者の方が大きい。Pitchの動きに顕著な違いが見て取れる。ベテランのPitchの動きには、それを制動する細かい動きが見て取れる。それを制御する、昇降舵も異なった操舵が発生している。

4.2 Pitchと操舵の位相遅れ

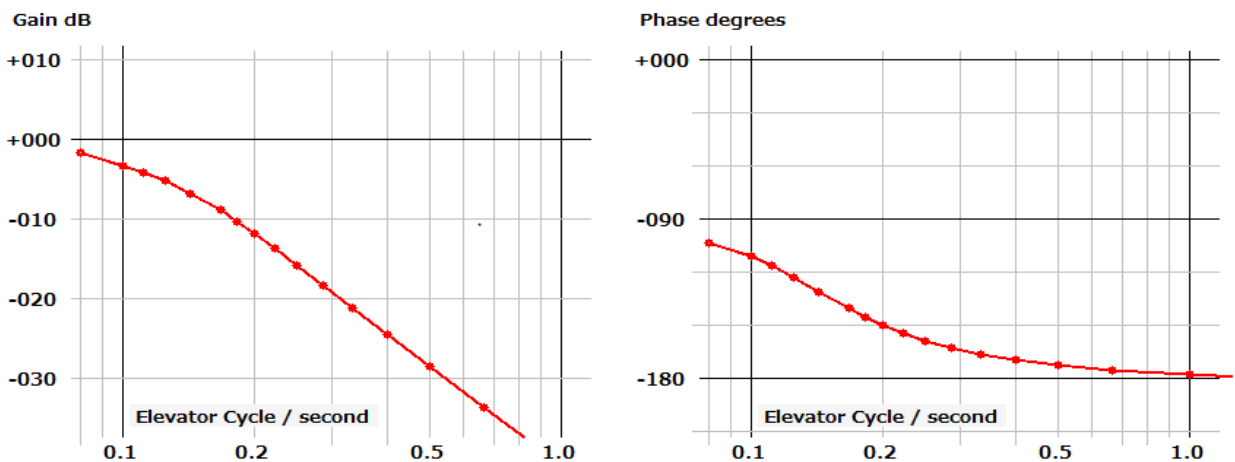


図 3 pitchと昇降舵の位相差

図 3 は、使用したSIMの位相遅れのグラフである。規則的なサインカーブの昇降舵入力操舵を行い、その時の昇降舵とPitchのスペクトルからGainと位相差を計算して、プロットしたものである。操舵周期2秒は位相遅れはマイナス170度前後となる。縦軸はgain(db)とphase(degree)で横軸はCycle/secondで6.3倍すれば通常のrad/secondとなる。

4.3 Pitchの動きのスペクトログラム解析とDamping action解析

4.3.1 典型的な解析結果のパターン

横軸は経過時間で0~150秒のグラフである。上段の縦軸はその時の操舵周期である。上段は、計算されたパワースペクトルで、その強度に対応して色付けした。強度が強いほど色が濃い。下段は、前述のDamping actionのバーコードである。

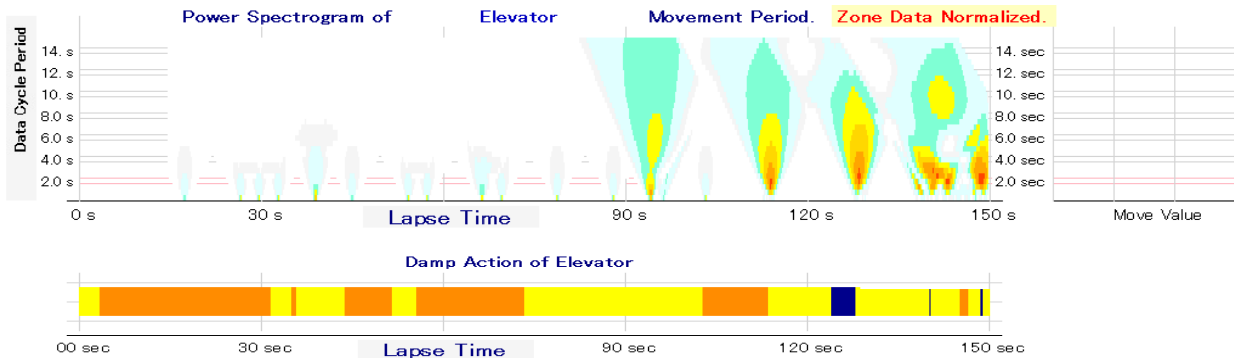


図 4a 超初心者 : キャンドル型

図 4a は初心者の操舵記録である。Spectrogramには蝋燭の様な形態が見られる。その下のDamping actionはまばらで、操舵に迷いが見られる。操舵もまばらである。

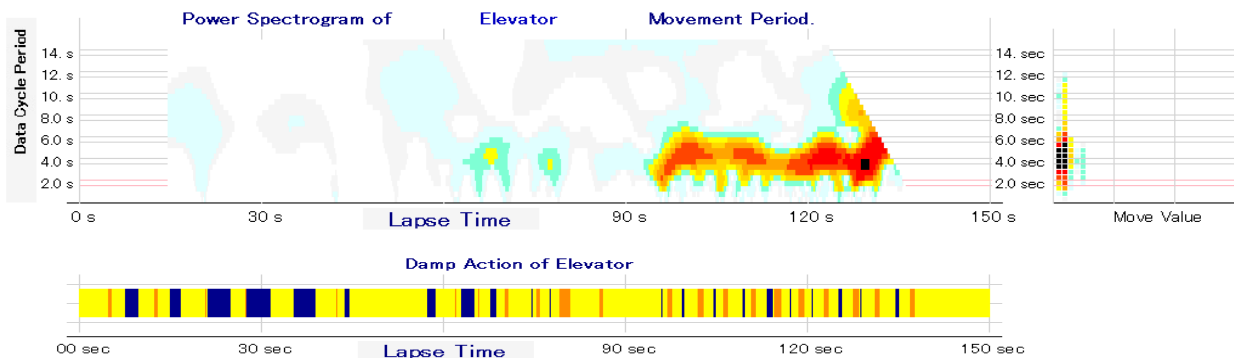


図 4b MS フライトSIMで練習した人 : ランタン型

図 4b はマイクロソフトのフライトSIMで練習してきた人に見られる形である。操舵周期が4~6秒に集中する。Damping actionは初心者より活発になるが其の回数は少ない。

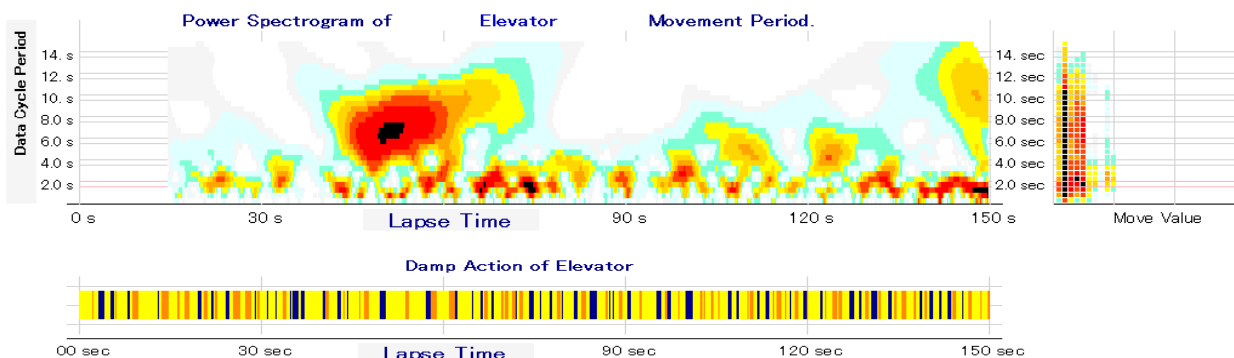


図 4c 現役、中型 JET 旅客機操縦士 : とろ火型

図 4c は現役の操縦士の記録である。とろ火型。操舵周期が 1.5~2 秒に集中する。Damping action は活発である。

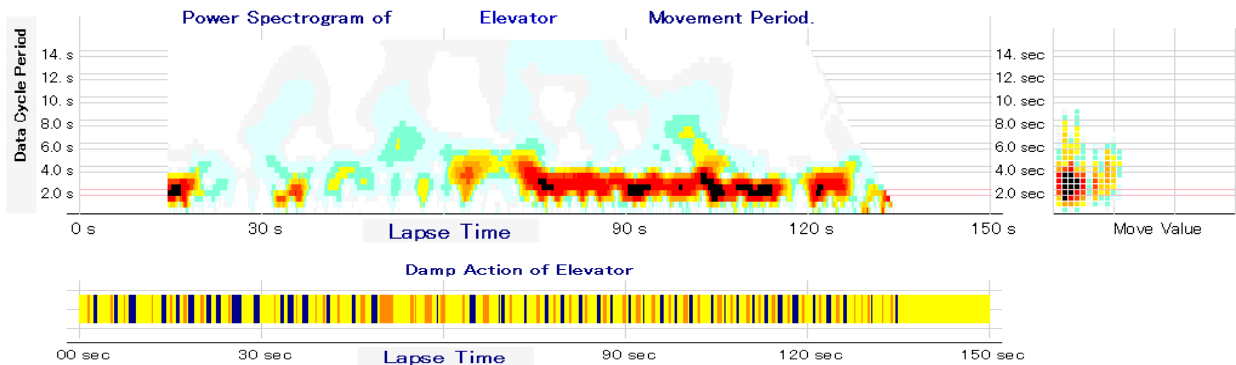


図 4d 現役、大型 JET 旅客機操縦士 有視界飛行

図 4d は、現役大型旅客機の記録である。操舵周期は 2 秒前後に集中する。Damping action は活発である。

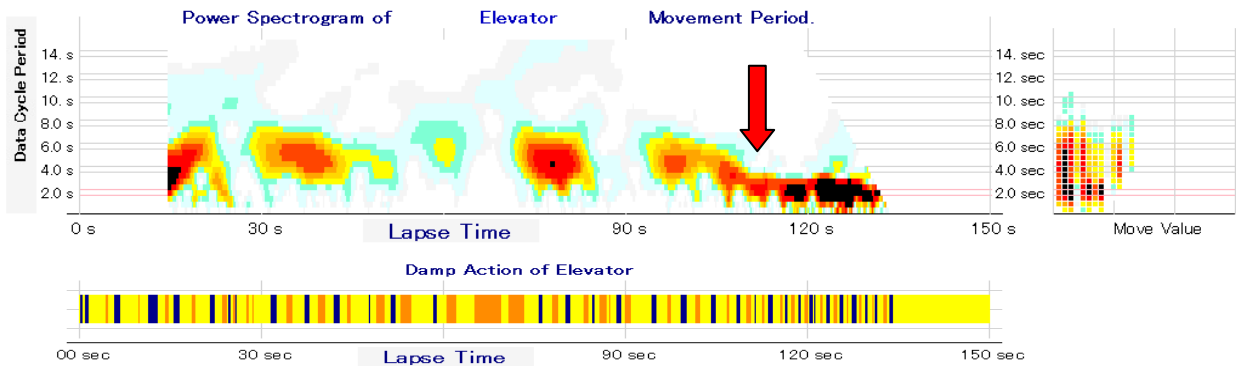


図 4e 現役、大型 JET 旅客機操縦士、計器飛行から有視界飛行

図 4e は、現役大型旅客機の記録である。滑走路を視認してからは (図 4e の矢印) 操舵周期は 2 秒前後に集中する。Damping action は活発となる。

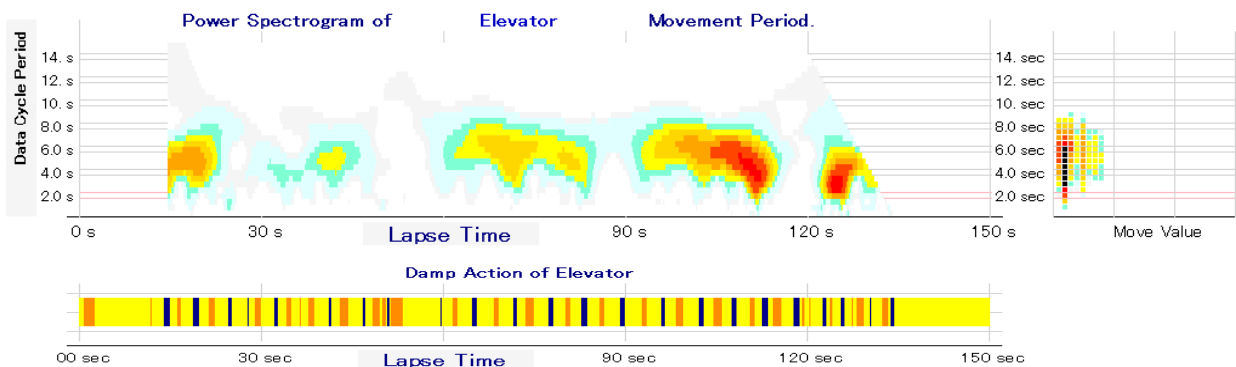


図 4f 現役、大型 JET 旅客機操縦士 長時間の計測

図 4f, 同じ操縦士の、長時間の計測修了に近い時の記録である。(疲労状態) ランタン型となった。

4.3.2 学部学生を長期間訓練した場合の操舵の変化記録

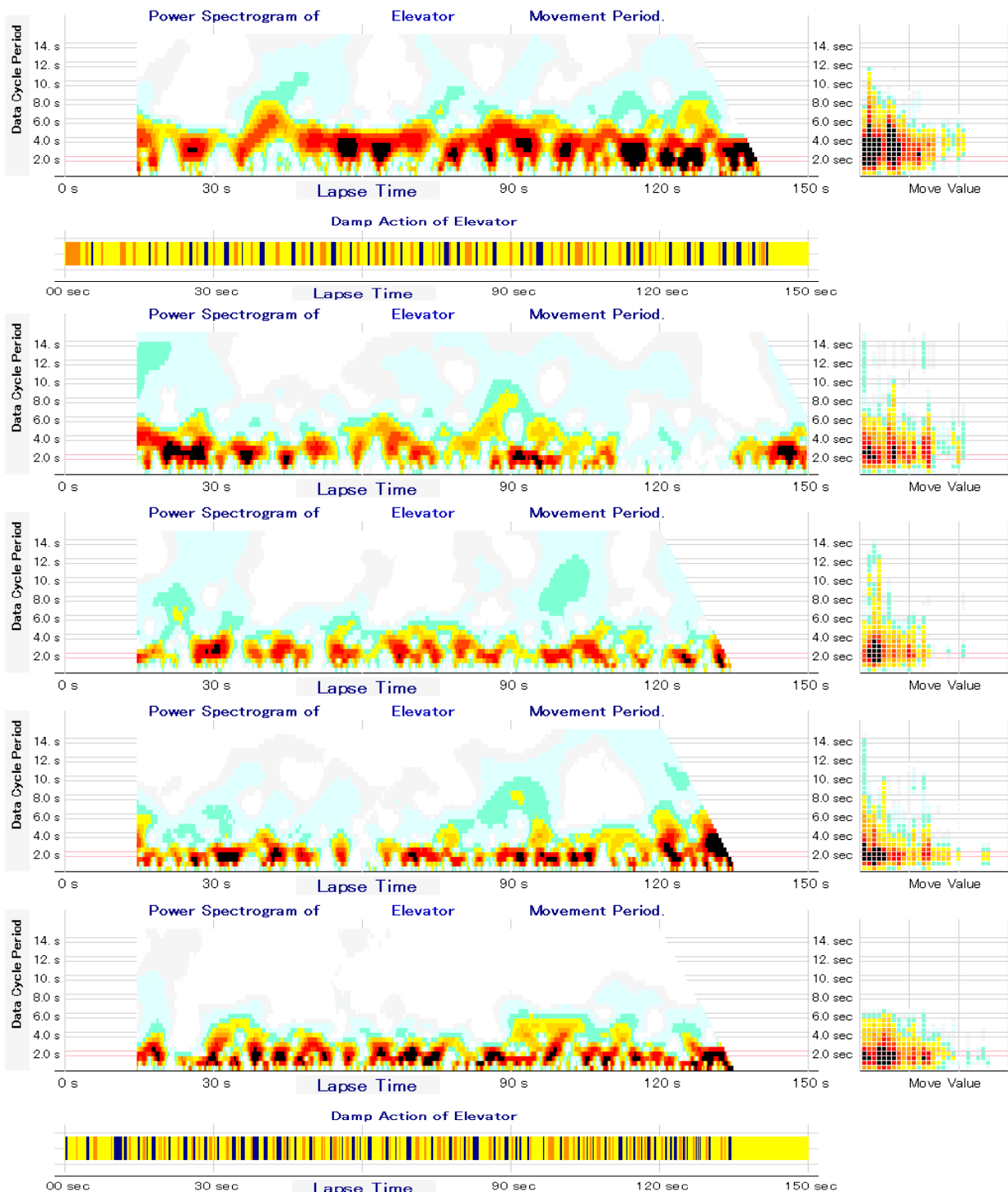


図 5 操舵記録の変化集

図5は、上から順番に、1月25日、2月22日、3月19日、3月29日、4月16日の記録である。経験を重ねる毎に、操舵周期が短くなり、プロの操縦士と同様に2秒前後に集中する。Damping actionも現役操縦士に近い。ただ操舵量は若干大きい。

4.4.1 瞳孔のサイズの変化

着陸操作時の操縦者の瞳孔のサイズ変化も計測した。操縦免許保持者は、着陸操作開始から、接地にかけて、瞳孔のサイズが大きくなる傾向にある。学部学生は、その傾向は安定しない。以下で典型的な例を紹介する。

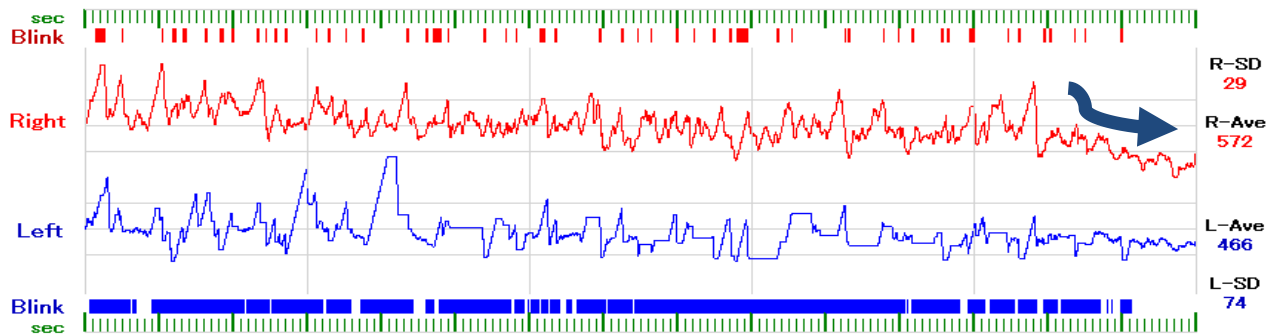


図 6a 初心者

初めての時の記録。図 6a 中の矢印の様に、接地にかけて瞳孔が小さくなっている。波形にも変化がみとれる。その時は、瞬きが止まっている。左目は計測不良である。

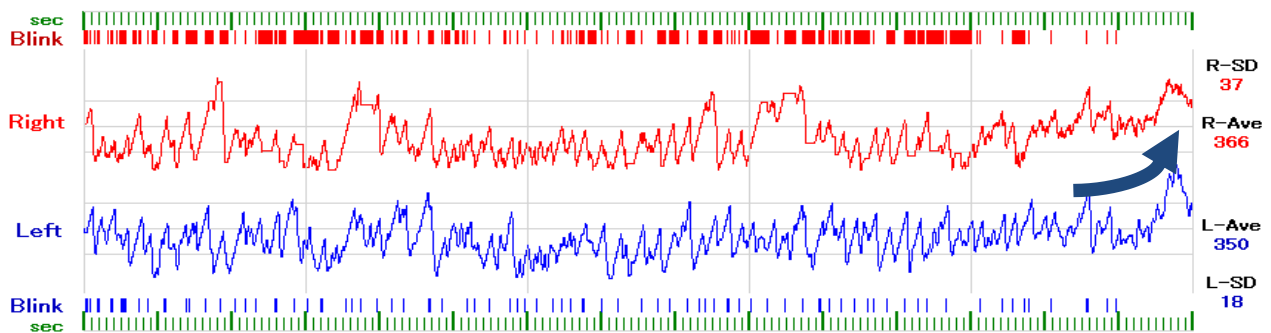


図 6b 現役、中型 JET 旅客機操縦士

図 6b は、現役の操縦士の記録である。接地にかけて、瞳孔が大きくなっている。プロの操縦士は接地操作中には瞬きはしない！

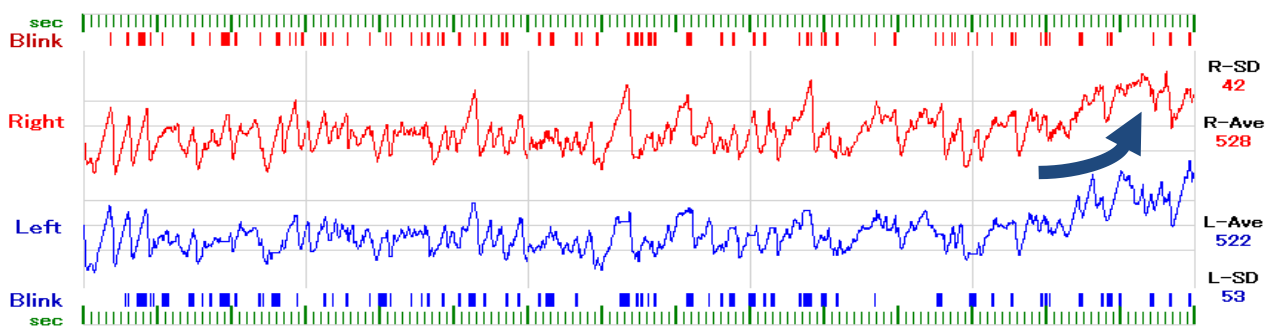


図 6c 学部学生、例外ケース

図 6c は、例外的なケースの紹介である。初めての SIM 操縦経験であるが、瞳孔の動きに関しては、プロと同等の変化傾向が見て取れる。プロが訓練で獲得した同じパターンである。これは操縦適性の指標として使える可能性を感じる。接地操作中の瞬きは、プロの操縦士と異なっているが、回数は減っている。

5. 結 語

プロの操縦者の昇降舵操舵周期は、2秒前後となった。学部学生も長期にわたる訓練で、その操舵周期は2秒前後に近づく。ところで、このシミュレータでは、その周期での位相差はマイナス170度前後である。

2秒に一回の操舵にも関わらず、パイロットは航空機を正常に着陸させている。この事が、将来的には、人間の操作を模した自動操縦装置（2秒に一回の制御）や、他の分野、例えば、遅い周期での制御システムの研究に繋がれば幸いである。

鈴木・土屋研究室のフライトシミュレータは、良くできているが、やはり限界がある、機会があれば、本物の飛行記録を解析して、この手法の有効性が検証できる事を期待している。

着陸操作時の瞳孔径の変化は、採用時の操縦適性試験や訓練中の進捗把握に使える可能性を示唆している。

謝辞

実験に参加して頂いた、現役の操縦士及び学部学生、その他大勢の皆様に、感謝申し上げます。

参考 文献

- 1) 上村 常治、鈴木 真二、ヨルグ・オノ・エントジンガー、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、香川県高松市、日本航空宇宙学会（J S A S S）、2013年11月。
- 2) J. O. Entzinger, T. Uemura, S. Suzuki, “Mental Effort and Safety in Curved Approaches”, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS2014), Sept. 2014, St. Petersburg, Russia.