

# 航空機の Side Slip が運航に及ぼす影響

水野 信也<sup>†1</sup>, 大場 春佳<sup>†1</sup>, 伊藤 貢司<sup>†2</sup>

**概要:** 今まで航空機のフライトデータは入手困難なデータであり、解析を行うには特別な環境、契約などが必要であった。そのため今までの解析は限定的だった部分もある。しかしながら、ビッグデータ時代となり、様々なデータが入手可能となった。例えば運航性能モデルに用いることが可能な BASE OF AIRCRAFT DATA (BADA) や気象庁発表の数値予報 GPV データがある。これらを利用して航空機の運航性能を評価している研究も多く、特に航空機の運航を改善できると年間コストも大きく違うことから、コスト削減の意識も非常に高い。本研究では、運航時の Side Slip に注目し解析を行う。Side Slip とは航空機が運航する時、進行方向に対して機首が右または左にずれた状態を数値化したものである。この Side Slip の原因は機体製造時のアンバランス、エンジン推力のアンバランス、またはエルロンのリギングが考えられるが、航空機製造メーカーはこれらを明らかにしていない。またこの Side Slip は BADA モデルに記載されておらず、今までの解析例はない。この Side Slip を解析できれば、安全性の観点からは、低視程下での厳しい運航下でオートパイロットをオフにして手動操縦にした時に傾きが発生するのを防ぐことができる。また経済性では、Side Slip によって発生する抵抗を減らすことにより、上昇率と降下率が改善され、巡航時の燃費消費が抑えられるなどの効果が得られる。

**キーワード:** フライトデータ, Side Slip, シミュレーション

## 1. はじめに

今まで航空機のフライトデータは入手困難なデータであり、解析を行うには特別な環境、契約などが必要であった。そのため今までの解析は限定的だった部分もある [1]。しかしながら、ビッグデータ時代となり、様々なデータが入手可能となった。例えば運航性能モデルに用いることが可能な BASE OF AIRCRAFT DATA (BADA) [2] や気象庁発表の数値予報 GPV データ [3] がある。これらを利用して航空機の運航性能を評価している研究も多い [4-7]。特に航空機の運航を改善できると年間コストも大きく違うことから、コスト削減の意識も非常に高い [8]。

本研究では、運航時の Side Slip に注目し解析を行う。Side Slip とは図 1 のように、航空機が運航する時、進行方向に対して機首がずれた状態を数値化したものである。

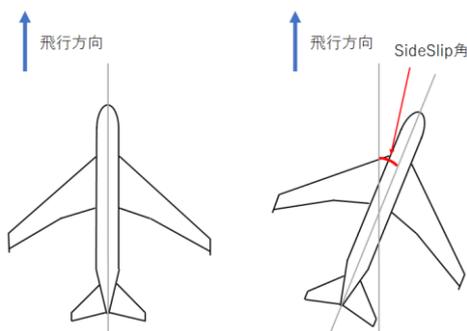


図 1 Side Slip 現象の概要

航空機は進行方向に対して設計されており、この僅かな進行方向とのズレが運航時の風圧制御を非効率にさせ、効

率的な運航の妨げとなる可能性がある。この Side Slip の原因は機体製造時のアンバランス、エンジン推力のアンバランス、またはエルロンのリギングが考えられるが航空機製造メーカーはこれらを明らかにしていない。またこの Side Slip は BADA モデルに記載されておらず、今までの解析例はない。この Side Slip を解析できれば次のような効果が期待できる。

- 安全性: オートパイロットをオフにして手動操縦にした時傾きが発生することを防ぐ
- 快適性: 微々たる傾きだが、改善することで快適性が得られる
- 経済性: Side Slip によって発生する抵抗を減らすことにより、上昇率と降下率が改善され、巡航時の燃費消費が抑えられる

この Side Slip はパイロットが運航中に意識的に Yaw trim を Sideslip Indicator が 0 となるまで操作することで発生を抑えることが可能である。しかしこの操作は特に義務化されているわけではなく、パイロットに任されているのが現状である。この Side Slip を見過ごすことで発生するコストを明示し、パイロットへの基本的な操縦スキルに対する啓蒙を行う。

## 2. フライトデータの基本解析

今回は実際の運航データを株式会社フジドリームエアラインズから提供いただき解析を実施した。航空機種は 11 種類、2016 年 3 月から 2017 年 4 月までの全 549 件であった。これはすべて同じパイロット 1 名のデータである。またデータは離陸直後と着陸直前の数分間のデータは除外し、1

<sup>†1</sup> 静岡理科大学 (連絡先: mizuno.shinya@sist.ac.jp)

<sup>†2</sup> 株式会社フジドリームエアラインズ

投稿: 2017 年 11 月 30 日

採択: 2018 年 3 月 1 日

万 feet 以上を切り出したデータとなっている。Side Slip に関するデータは、1 秒につき 1 回の情報を取得している。

## 2.1 フライトデータのデータベース構造

フライトデータには様々な要素があり、データベース構造を示すことは今後増えていくデータに対して同様な解析を実施するために必要である。また新たな要素に対し解析を行いたい場合の基本設計にもなり得る。図 2 は本研究で用いた主なデータのデータベース構造である。ここでフライトテーブルの機体 id は機体テーブルの外部キーとなっており、同様にフライトデータテーブルはフライトテーブルの外部キーとなってリレーションを形成している。

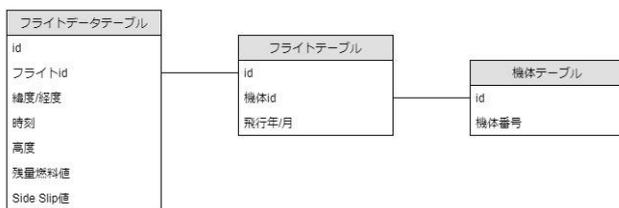


図 2 フライトデータのデータベース構造

## 2.2 Side Slip に注目した基本解析

まずはこれらのデータをデータベース化し、各項目の可視化を実施した。図 3 は機体番号 1 の飛行時間に対する Side Slip 値の変化の様子である。また図 4 は機体番号 3 の飛行時間に対する Side Slip 値の変化の様子である。これらからも機体差だけでなく、航路、天候など様々な条件が重なり Side Slip 値に影響していると考えられる。図 5 は各機体の Side Slip 平均値である。これらからも機体によって Side Slip の発生とバラツキがあることがわかる。

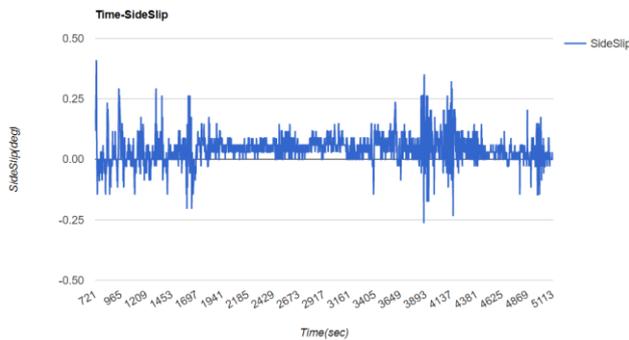


図 3 機体番号 1 の飛行時間に対する Side Slip 値

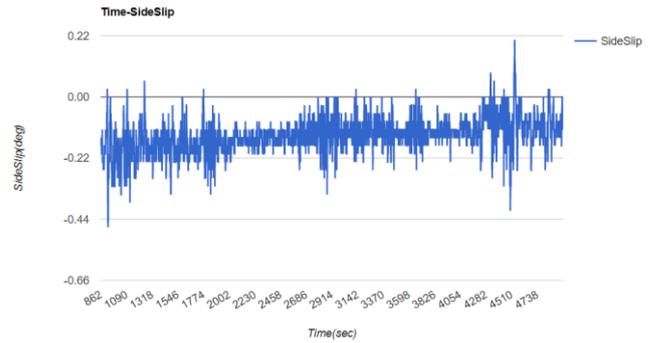


図 4 機体番号 3 の飛行時間に対する Side Slip 値

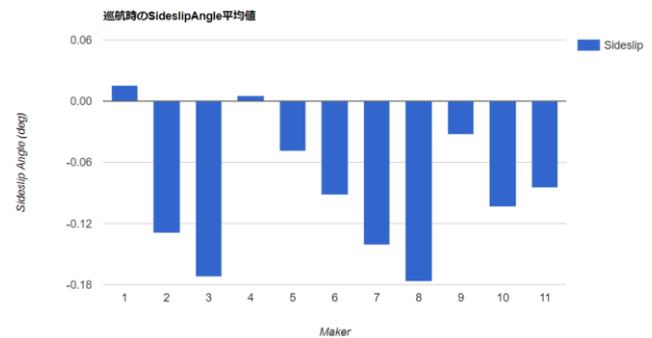


図 5 各機体の Side Slip 平均値

## 2.3 Side Slip の機体差の検証

ここでは Side Slip の機体差の検証を実施する。図 6 は Side Slip 値を機体ごとに比較したものである。機体 2 のように非常にバラツキが大きいものから、機体 5 のようにバラツキが小さいものまでである。これらのデータを Bartlett 検定で等分散性の検証を実施したが、 $p\text{-value} < 2.2e-16$  となり、帰無仮説が棄却され等分散性は得られなかった。そこで Steel-Dwass の多重比較を実施したところ、表 1 のように多くの機体で有意差が見られた。今回は 3 種の機体データを用いている。機体番号(1,2,4)、機体番号(3,5,6,7,8)、機体番号(9,10,11)がそれぞれ同一機種である。表 1 の中で、赤下線、青下線はそれぞれ同機種間での有意差、異機種間での有意差があったことを表している。同一機種の中でも有意差が見られることから、設計構造や検査などで発見できない僅かな歪みが Side Slip を引き起こしていると考えられる。これから Side Slip の機体差は、様々な機体を操縦しなければならないパイロットへの影響は無視できないものである。このことから、安全な運航をするためには注意すべきファクターと考えられる。

表1 Steel-Dwass を利用した多重比較 (P 値)

|    | 2               | 3               | 4               | 5               | 6               | 7               | 8               | 9               | 10              | 11              |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1  | <u>2.75E-08</u> | <u>1.30E-13</u> | 7.84E-01        | <u>5.35E-09</u> | <u>1.01E-08</u> | <u>3.22E-11</u> | <u>1.12E-13</u> | <u>1.30E-06</u> | <u>2.11E-13</u> | <u>1.68E-09</u> |
| 2  |                 | 7.42E-01        | <u>2.53E-04</u> | <u>3.81E-01</u> | 9.97E-01        | 1.00E+00        | 6.59E-01        | <u>1.11E-02</u> | 1.00E+00        | 9.81E-01        |
| 3  |                 |                 | <u>1.42E-10</u> | <u>5.33E-08</u> | <u>9.14E-04</u> | 7.23E-01        | 1.00E+00        | <u>3.26E-11</u> | <u>6.75E-04</u> | <u>5.71E-04</u> |
| 4  |                 |                 |                 | <u>3.91E-03</u> | <u>1.82E-06</u> | <u>1.03E-08</u> | <u>1.51E-10</u> | 5.03E-01        | <u>8.91E-09</u> | <u>1.74E-04</u> |
| 5  |                 |                 |                 |                 | <u>1.00E-03</u> | <u>6.60E-06</u> | <u>3.76E-08</u> | <u>4.13E-01</u> | <u>9.60E-05</u> | 6.75E-01        |
| 6  |                 |                 |                 |                 |                 | <u>1.33E-02</u> | <u>5.02E-04</u> | <u>4.58E-05</u> | 1.00E+00        | 9.66E-01        |
| 7  |                 |                 |                 |                 |                 |                 | <u>2.50E-01</u> | <u>8.81E-09</u> | <u>5.46E-02</u> | <u>3.35E-02</u> |
| 8  |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | <u>5.14E-12</u> | <u>3.24E-04</u> | <u>2.23E-04</u> |
| 9  |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | <u>1.07E-07</u> | <u>6.81E-03</u> |
| 10 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 9.11E-01        |

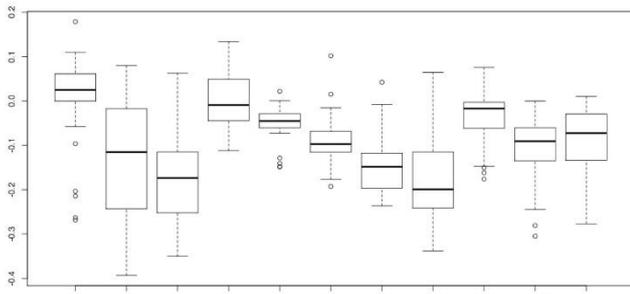


図6 各機体の Side Slip 値のバラツキの様子

### 3. Side Slip のコスト影響度とその対策

Side Slip がコストに対してどの程度影響があるかを検証する。図7は Side Slip の絶対値に対し、1秒間当たりの燃料消費率を表している。回帰直線からもわずかであるが、Side Slip 値が増すと燃料消費率が上昇する傾向が見られる。しかし R<sup>2</sup> 値が 0.025 と回帰直線としては信頼性に乏しい結果となった。これには航空機の運航には、その時の天候、乗客数、飛行高度など多くの燃費消費率に関する要素があるためである。

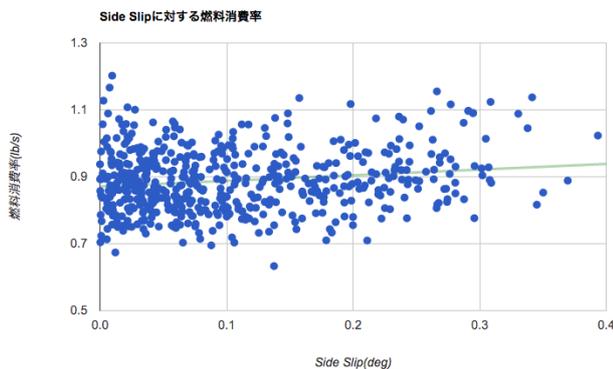


図7 Side Slip 値に対する燃料消費率(lb/s)

そこで Side Slip と燃費消費率の関係を明確に算出するために、実際にパイロットの訓練で用いるシミュレータで確認した。機体の設計データが公開されている場合は、独自のシミュレーション環境を構築しシミュレートが可能であ

るが、エンブラエル社は設計データを公開していない。そこで、エンブラエル社の機体設計を反映しているカナダ CAE 社のエンブラエル 170 のフルフライトシミュレータを利用した[9]。今回のシミュレーションでは、1 経路の模擬フライトを用意する。その中でシミュレーターの Rudder Trim を操作し、垂直尾翼の舵面をごく僅か右、もしくは左にずらして、人為的に Sideslip 状態を再現させる。Rudder Trim を 5 段階に分け、Side Slip 量を一定時間保ち、同じ時間間隔で燃料消費率を取得して、得られた値をプロットする。ただし燃料消費率取得時は Side Slip 量だけ変化させ、燃料消費に対する機体重量減少は無く、運航高度は同じ条件にしている。また自動操縦装置(方位維持、高度維持、オートパイロットで速度維持をオートスロットル)でシミュレーションを行い、人間は介入していない。図8は Side Slip が燃料消費率にどの程度影響があるかをシミュレーションした結果である。Side Slip が 0.0 の時の燃料消費率を 1620lb/h とした場合、Side Slip が 0.25 度増えると燃料消費率が約 10lb/h 増加していることがわかる。この増加量は 10/1620=0.06 より 0.6% 程度の影響が考えられる。

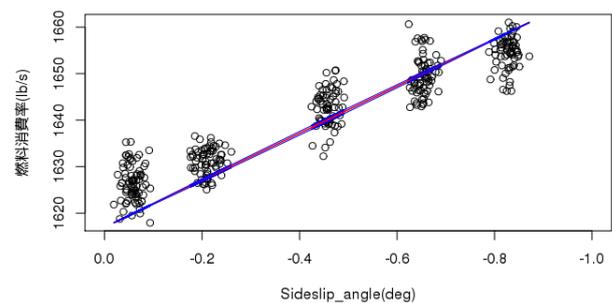


図8 Side Slip に対する燃料消費量の増加の様子

表2 回帰直線の情報

| Item      | Coefficient Value | P Value |
|-----------|-------------------|---------|
| Intercept | 1624.23           | < 2e-16 |
| Gradient  | -37.74            | < 2e-16 |

\* Multiple R-squared : 0.8904

次に得られた値を利用してコストシミュレーションを実施する。まず 1 巡航に対する Side Slip の影響を考慮した

燃料消費量の増分を式(1)から算出する。燃料消費増割合は上記シミュレーションで得られた値を利用している。

$$\text{燃料消費量増分} = \text{巡航時間} \times \text{平均燃料流量} \\ \times \text{SideSlip 量} \times \text{燃料消費増割合} \quad (1)$$

ここで巡航とは、航空機が水平飛行を維持している状態であり、フライトデータの中に水平飛行かどうかを判断する指標が含まれている。今回利用する巡航データは、「3分以上の継続水平飛行」とし、一つのフライトデータから1つ以上の巡航データが得られている。ただし水平飛行の開始及び終了時には飛行が安定しないことが多いため、各水平飛行時間の最初と最後5%のデータは利用していない。一つのフライトから得られた巡航データから巡航時間の長い方から1フライト当たり最大2件を採用する。全フライトデータから巡航データを抽出すると合計804件となり、これをコスト計算に用いる。

式(1)から804巡航データの燃料消費増分総和は2,198lbとなる。この中からSideSlip値が0.1未満のデータをSideSlipの許容量として削除する。SideSlip値が0.1以上のデータの燃料消費量増分和は1,733lbとなり、これは増分の78.8%に相当する燃料消費量が削減可能量となる。

上記はパイロット一人分のデータだったが、本研究で得られた結果はパイロットの操縦技術に依存するものではない。この計算を一人のパイロット基準として人数の積をとることで、会社全体でのコスト削減量を考えてみる。株式会社フジドリームエアラインズでは静岡基地に機長5名、名古屋基地に機長約40名が所属している。名古屋基地の巡航時間は運航経路から静岡基地の半分と仮定する。燃料単価を40円/lbとすると、燃料費削減可能量は、

$$1,733\text{lb} \times (5 + 40/2) \times 40\text{円/lb} = 1,733,000\text{円}$$

となり、約1年間で会社全体で約173万円のコスト削減が可能となる。

#### 4. さいごに

本研究では航空機の運航時におけるSideSlip値に注目し、その基本解析から機体毎のSideSlip度合いの違い、そしてSideSlipに着目したシミュレーションを実施して、SideSlipと燃料消費量の関係を示した。またシミュレーションで得られたSideSlipに対する燃料消費増割合を用いて、パイロット一人あたりの燃料消費量の削減可能量を算出し、会社全体での燃料費削減可能量を示した。このSideSlipに対してパイロット各々が再認識し、その軽減に努めることで、大きなコスト削減につながる事が明確になった。

今回は解析において一人のパイロットのデータを用い

ている。データサイエンスの観点からも、今回のような機密性が高いデータに関しては、データ利用範囲を最初は限定し、効果を検証した後、データ利用範囲を拡大していくのが望ましい。今回は1万feet以上のデータを用い、巡航時の自動操縦が大部分のデータのため、パイロット個人の能力差は大きく影響していないと考えられるが、今回の結果を基に、複数パイロットデータを用いての検証も必要となる。

今回シミュレータで算出した値を回帰分析したが、シミュレーションからコスト算出までを単純にするために回帰直線の算出までに留めている。グラフからSideSlipの絶対量が小さいと直線上部にプロットが多く、絶対量が多い場合は直線下部にプロットが多くなる。そのため、回帰曲線を算出し、フィッティング精度の確認、及び現実的な精度での区間推定をすることで、実際の運航に対するより明確な指標となる。今後は各便の出発地と目的地の関係、上昇中の抵抗増による燃料消費量の増加、降下中の抵抗増による燃料消費量の増加などを考慮し、さらに明確なSideSlipの燃料消費量に対する影響を考えていく。

#### 謝辞

本論文を作成するにあたり、静岡理科大学の海野萌さんと鈴木涼太郎君にはデータ集計やデータベース作成において大変ご尽力いただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 溝口徹夫. “航空交通におけるフライト効率の定式化,” 情報処理学会研究報告高度交通システム, Vol. 61, pp. 9-16 (2007).
- [2] “Base of Aircraft Data (BADA).” <http://www.eurocontrol.int/services/bada> (2017年08月15日アクセス)
- [3] “オンライン気象情報.” <http://www.jmbnc.or.jp/jp/online/file/online10100.html> ((2017年08月15日アクセス)
- [4] 十時寛典, 小塚智之, 宮沢与和, 船曳孝三. “定期便フライトデータと気象庁数値予報GPVデータとの比較評価,” 航空宇宙技術, Vol. 12, pp. 57-63 (2013).
- [5] 田村恵一, 原田明徳, 樋口雄紀, 松田治樹, 宮沢与和. “貨物便の飛行データを用いた航空機の性能モデルに関する研究,” 航空宇宙技術, Vol. 16, pp. 27-36 (2017).
- [6] 宮本侑斗, 原田明徳, 宮沢与和, 船曳孝三. “BADAモデルを用いた旅客機の軌道最適化による運航効率の評価,” 航空宇宙技術, Vol.13, pp.1-10 (2014).
- [7] 溝口徹夫. “航空交通におけるフライト効率の定式化,” 情報処理学会研究報告高度交通システム (ITS), Vol.2007, No.61 (2007-ITS-029), pp. 9-16 (2007).
- [8] “ビッグデータを活用した航空燃料コストの削減.” <https://gereports.jp/southwest-save-100million/> (2017年08月15日アクセス)
- [9] “AIRCRAFT PLATFORM.” <http://www.cae.com/civil-aviation/commercial-aviation/pilot-training/aircraft-platform/> (2017年08月15日アクセス)

## The Influence of the Aircraft's Side Slip on Flight

Shinya MIZUNO<sup>†1</sup> Haruka OHBA<sup>†1</sup> Koji ITO<sup>‡2</sup>

**Abstract:** Flight data of aircraft has been difficult to obtain until now. For us to analyze, we needed special environment, contract etc. As a result, analysis up to now has been limited. However, from the big data environment, we have various data available. For example, there are BASE OF AIRCRAFT DATA (BADA) that can be used for operational performance model and numerical forecast GPV data released by Japan Meteorological Agency. Many researches have been conducted to evaluate the flight performance of aircraft using these, Especially when we can improve the operation of the aircraft, the annual cost is also greatly different, so the consciousness of cost reduction is very high. In this research, we focus on the side slip at flight and analyze it. Side Slip is a numerical representation of the state where the nose is shifted with respect to the traveling direction when the aircraft is in operation. The cause of this side slip may be imbalance at aircraft manufacturing, imbalance of engine thrust, or aileron rigging, but aircraft manufacturers do not clarify it. Moreover, this Side Slip is not described in the BADA model, and there are no analysis examples so far. If we can analyze this Side Slip, for safety, we can prevent inclination from occurring when turning the auto pilot to manual control by turning off the auto pilot and by reducing the resistance caused by Side Slip, for economy, the rate of increase And the descent rate are raised, and the effect such as fuel consumption when cruising is suppressed can be obtained.

**Keywords:** Flight Data, Side Slip, Simulation

---

<sup>†1</sup> Shizuoka Institute of Science and Technology  
(Corresponding Author: mizuno.shinya@sist.ac.jp)

<sup>‡2</sup> Fuji Dream Airlines Co., Ltd.

Submitted: 30/11/2017

Accepted: 01/03/2018