

フラジリティ曲線による航空機着陸時の風速基準値の検討

中央大学 学生会員 ○竹本 純平 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

2009年3月23日千葉県成田国際空港においてフェデラルエクスプレスの貨物機が着陸時に滑走路でバウンドし、横転した後に炎上する事故が発生した。事故調査委員会の報告書によると、着陸時にダウンバーストが発生し、向風から追風への風向きの急な変化や風速に気を取られたパイロットによる操作ミスが事故の最大の要因とされている。

航空機の着陸時における風に関する基準値は航空会社や機種によって異なり、基準値内の着陸は乗務員の判断となる。このため着陸時の気象的要因は乗務員の判断ミスへと繋がり、ヒューマンエラーの原因になると考えられる。

そこで本研究では、風が航空機の着陸に及ぼす影響を確率論的に分析し、着陸時の風速基準値の検討を行う。

2. 研究手法

本研究では、フラジリティ曲線（被害率曲線）やフラジリティ曲面を用いて風速基準値の分析、検討を行う。フラジリティ曲線とは横軸に地震動など外力や攪乱要因をとり、縦軸に被害率をとって全壊率や半壊率を記述し、ある地域内の構造物の被害の程度の定量的な評価を行うために用いられる。¹⁾

本研究では、フラジリティ曲線の横軸を着陸時の風速や風向（航空機着陸進入方向に対する角度）、縦軸を事故の発生確率として確率モデルに当てはめて検討を行うこととする。

3. 風速による事故の発生確率について

3.1 事故の発生確率について

本研究では、フラジリティ曲線の縦軸に1kt（約0.5m/s）から25kt（約12.9m/s）まで0.5kt（約0.25m/s）ごとそれぞれの風速における事故の発生確率を用いるため、ベイズの定理を適用する。実際には、分母側に「風速の頻度分布」をとり、分子側に「事故が発生した条件下での風速の発生確率」に、「航空機が着陸時に事故を起こす確率」を乗じた値をとり、百分率で示した数値を用いる。

3.2 風速の発生頻度分布に関して

風速の発生頻度分布を求めるために気象庁のデータベースより2017年における風速、風向の収集を行う。日本の空港の立地条件は様々であり、立地場所や季節により風速や風向の発生の仕方が異なるため、日本にある空港のうち、国、地方が管理を行

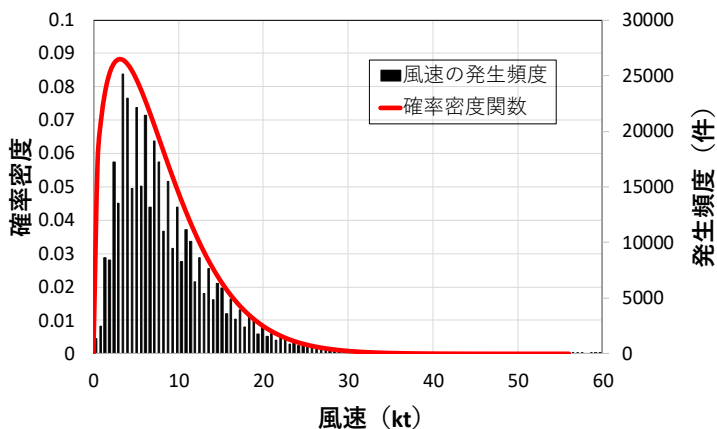


図-1 風速の発生頻度分布

っている45空港に関して2017年の1年間1時間毎の風速、風向394,200件のデータを収集した。

次に風速の発生頻度を求めていくこととする。風速の発生頻度分布は式(1)のようなワイブル分布に従うこととした²⁾。

$$f(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right\} \quad (1)$$

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2)$$

ここで、 $f(x)$ は風速 V の出現率、 c は尺度パラメータ、 k は形状パラメータ、 Γ はガンマ関数とする。この二つのパラメータは未知であるため、ワイブル確率紙による最適値の推定を行った。その結果、形状パラメータ k を示す回帰直線の傾きが1.36と算出できたため、形状パラメータとして用いることとした。また算出した形状パラメータを式(2)に適用し、尺度パラメータ $c=8.32$ と確定した。算出結果を図-1に示す。

3.3 事故が発生した条件下での風速の発生確率

本研究では、運輸安全委員会の事故調査報告書から得た52件の事故発生時の風速データを用いて検討を行う。

事故が発生した条件下での風速の発生確率の算出を行うには確率密度関数が必要である。そのため4kt（約2.0m/s）毎のヒストグラムを作成し、その外形より正規分布の当てはめ確率密度関数を求める。その後、求めた確率密度関数が正規分布に従うことが適切であるかを検討するために、正規確率紙による検定を行う。ここでは、確率紙の回帰直線を用いて、信頼度を示す相関係数 R^2 が0.97と1に近似できる値を示したため、正規分布に従うこととした。

キーワード: フラジリティ曲線 ワイブル分布 RS

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL.03-3817-1816 FAX.03-3817-1

3.4 航空機が着陸時に事故を起こす確率

着陸時の航空機事故の確率は、直接的に算出することができなかったため、RS という滑走路での事故の確率を代用値として用いることとする。ICAO が発行しているセーフティーレポートでは、2017 年の世界の航空事故平均発生件数は、フライト 100 万回当たり、2.4 回と示されている。³⁾ また 2017 年における事故のうち 55% は RS に分類されるため、着陸時に事故となる確率は 1.32×10^{-6} と算出でき、この数値を用いることとする。

4. フラジリティ曲線の作成による考察

前章で求めた事故発生確率と風速の発生頻度分布を用いて、フラジリティ曲線を作成する。しかし、フライト 1 回あたり事故の発生確率は最大の場合でも風速 23.5kt (約 12m/s) の時に 6.78×10^{-4} と非常に低い確率であるため、検討が困難であることが分かった。そこでフライト 10 万回あたりに換算し、フラジリティ曲線を作成して検討を行うこととした。3 次曲線に近似したフラジリティ曲線を図-2 に示す。これよりフライト 10 万回あたりの事故の確率は 23.5kt (約 12m/s) の時に 67.8% と算出することができ、風速 23.5kt (約 12m/s) の状態で毎日 1 回フライトすると 274 年に 1 度事故が発生するという非常に低い確率であることが分かる。しかし、近似曲線は原点付近で立ち上がりが見てとれるため、不自然な形となっている。

5. フラジリティ曲面への応用

風速による事故の発生確率と併せて風向きも航空機の着陸時に影響を及ぼす要素となると仮定する。ここで、 X_1 軸を風速の横風成分値、 X_2 軸を風向の度数変換値、縦軸を事故の発生確率としてフラジリティ曲面を作成し、3 次元的な視点から検討を行うこととする。なお風向に関しては、航空機の進入に対する角度であり、180°を向風、360°を追風とする 0°は風が吹いていない状態を示している。

事故の発生確率の算出に際しては、風向による事故の発生確率と、風速の横風成分値による事故の発生確率を、それぞれ独立な事象として、お互いを乗ずることとして、図-3 に示す。

グラフの外形は、フラジリティ曲線のように急な立ち上がりや、なだらかなカーブを描けては無い。ここで風向きが 360°、つまり着陸進入に対して追風の場合横風成分値が大きくなるにつれて事故の発生確率が上昇傾向にある。また航空機は向風時に着陸を行うことを考慮すると、図-3 に示す曲面は追風での事故の発生確率が極端に高くなっているため、一見矛盾が生じているように表されている。しかし、航空機が向風の状態で着陸態勢に入り、滑走路に接地する間に風向きが急変することは有り得る。そのため図-3 では航空機が向風の状態で着陸態勢に入り、滑走路に接地する間にダウンバーストやウィンドシアの発生により風向きが追風に急変する時、事故のリ

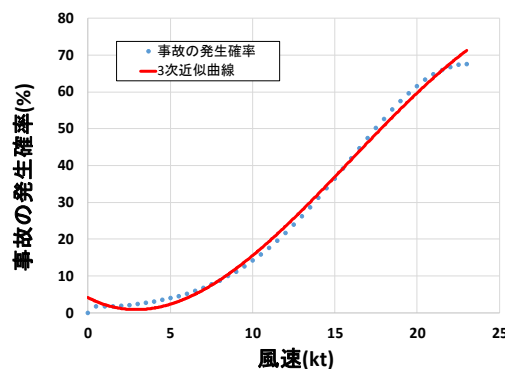


図-2 フライト 10 万回あたりの事故発生確率

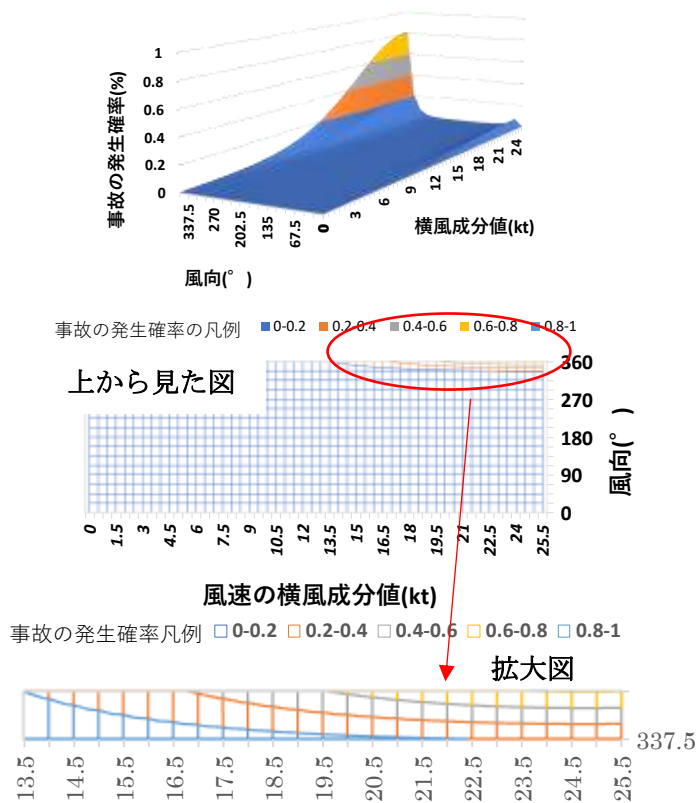


図-3 3次元フラジリティ曲面

スクが高まること分かる。

7. おわりに

本研究では風が航空機の着陸に及ぼす影響をフラジリティ曲線により確率論的に分析し、風速基準値の検討を行った。結果は 1 章で記述した事故例のように航空機の着陸時にダウンバーストやウィンドシアなどの風向の急な変化が生じるような場合に事故に至るリスクが高くなることが確認できた。

しかし風の吹き方には地域ごとに特性があり、空港の立地条件によっても異なる。そのため今後は、海上空港、山間部の空港、内陸空港に分類しフラジリティ曲線の作成を行い地域ごとの風の吹き方を考慮していくこととする。

参考文献・出典

- 1) Excel で学ぶ地震リスク評価、技報堂出版 2011 年
- 2) 土木学会編：性能設計における土木構造物に対する作用の指標
- 3) ICAO: safety report 2017 年