

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1129

October 2020

放送型自動位置情報伝達・監視データによる滑走路安全区域の 評価手法とその試行

井上 岳・黒田 優佳・森井 達也

A Methodology and Trial Implementation for Evaluating the Performance of
the Runway-End-Safety-Area at a representative Japanese Airport

INOUE Gaku, KURODA Yuka, MORII Tatsuya

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1129 October 2020

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019 〕
E-mail:ysk.nil-pr@gxb.mlit.go.jp

放送型自動位置情報伝送・監視データによる 滑走路端安全区域の評価手法とその試行

井上岳*・黒田優佳**・森井達也***

要 旨

放送型自動位置情報伝送・監視装置（ADS-B）は、航空機に搭載され、これにより運航及び位置に関する情報が地上に対し常時伝送されている。本資料は当該データの活用により、滑走路端安全区域の性能評価を行う方法を提案するものである。

キーワード：空港計画、放送型情報伝送・監視装置，滑走路端安全区域，RESA，ADS-B

*前 空港研究部空港計画研究室長

**空港研究部主任研究官

***空港研究部空港計画研究室 研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail：ysk.nil-pr@gxb.mlit.go.jp

A Methodology and Trial Implementation for Evaluating the Performance of the Runway-End-Safety-Area at a representative Japanese Airport

INOUE Gaku*

KURODA Yuka**

MORII Tatsuya***

Synopsis

Real-time data including flight information, location and velocity is transmitted at all times to the ground by the ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) equipment installed in aircraft. This paper presents a methodology to evaluate RESA (Runway End Safety Area) performance by using the ADS-B data, and an example of its application at a representative airport in Japan.

Key Words: airport planning, ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast), RESA (Runway End Safety Area)

* Former Head of Airport Planning Division, Airport Department

** Senior Researcher of Airport Department

*** Research Engineer of Airport Planning Division, Airport Department

National Institute for Land and Infrastructure Management

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone: +81-46-844-5019 Fax: +81-46-842-9265 E-mail: ysk.nil-pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. ADS-Bの概要およびデータ受信方法	1
2.1 ADS-Bの概要	1
2.2 ADS-Bデータの受信	2
3. 滑走路端安全区域（RESA）の安全性評価	2
3.1 既往の評価手法	2
3.2 評価手法の提案	4
3.3 国内空港への試行	4
3.4 評価手法・試行の評価	6
4. おわりに	7
謝辞	7
参考文献	7

1. はじめに

滑走路、駐機場などの空港基本施設の計画においては、航空機運航の円滑性と安全性の確保が重要である。特に、厳しい用地制約下にある本邦空港において、拡張その他空港機能強化を図る際には、その計画を可能な限り合理化することが求められている。従前、空港機能強化を計画する際には、目視、または、臨時にレーダーを設置することにより、時間毎の交通量その他必要なデータを取得し計画の合理化に努めてきた。滑走路端安全区域（RESA: Runway End Safety Area）など、航空機運航の安全を確保するための施設を計画するにあたっては、広範な空港を対象としたクロスセクションデータによる検討が行われてきた。しかしながら、航空機のオーバーランやアンダーシュートなど、インシデント発生事案の数がそもそも極めて小さい事象を対象とする場合、計画対象空港固有の状況（空港基本施設の諸元、気候、交通流の状況）を細かく勘案することが困難である。つまり、対象とする空港においては、インシデントによるリスク見積が、過大・過少両方にバイアスがかかる可能性がある。

管制システムの能力向上の必要性から、国際連合の専門機関の1つである、国際民間航空機関（ICAO: International Civil Aviation Organization）が定めた機体の識別コード、衛星航法による位置、（三次元の）Velocity（速度）、高度、その他の情報を1秒以内の短い間隔で自動送信を行い、管制機関がそれを受信し処理して管制能力の向上を図る放送型自動位置情報・伝送監視機能（ADS-B（Automatic Dependent Surveillance-Broadcast））の開発が進んでおり、航空機へのADS-B搭載

の義務化が米国及び豪州などで進められている。また、本邦空港に飛来する国際線のみならず、本邦航空運送事業者が運航する国内線においても、ADS-B搭載が進められている。

本稿は、運航航空機が運航情報及び位置などの情報を常時伝送するADS-Bデータを活用することにより、滑走路端安全区域の性能評価をより合理的に行う手法を提案するとともに、本邦の代表空港における評価試行情報を報告する。ADS-Bデータによる空港計画の合理化への展望について言及する。

2. ADS-Bの概要およびデータ受信方法

2.1 ADS-Bの概要

総務省情報通信審議会情報通信技術分科会航空無線通信委員会の報告¹⁾を引用すると、「被監視者（航空機側）が自ら監視情報（識別、位置、速度、経路意図等）を多数の監視者（管制機関側）に一括送信するものであり、従来方式と比較して電波の利用効率が向上するという利点を有している」とされている。また同報告は、ADS-Bの特徴として「高性能の航法装置と組み合わせることにより、高精度かつ高信頼の監視情報が得られる」「電波の有効利用が可能」、「高信頼の監視情報が得られるシステムが、無指向性アンテナを用いることで安価に実現可能」の三点を挙げている。

ADS-Bにより取得できる情報は、日付、時刻（時分秒）、Hex Code（航空機の登録番号に1対1に対応する固有の番号）、便名、航空機の位置を示す緯度、航空機の位置を示す経度、航空機の位置を示す高度、水平速度、鉛直速度、および、磁角（機首が向く方向を、真北を0とし時計回りの角度で表現したもの）となっている（図-1）。

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
1	2017/01/01	23:46:44.000	1001	06A0A6		35.54836	139.7667	0.0	157.5
2	2017/01/01	23:46:49.000	1001	06A0A6		35.54836	139.7667	0.1	150.1
3	2017/01/01	22:33:11.000	1001	06A0A6	QTR812	35.54826	139.7774	61.0	330.1
4	2017/01/01	22:33:13.000	1001	06A0A6	QTR812	35.54884	139.7770	59.0	330.1
5	2017/01/01	22:33:17.000	1001	06A0A6	QTR812	35.54951	139.7765	51.0	327.3
6	2017/01/01	22:33:20.000	1001	06A0A6	QTR812	35.55012	139.7761	43.0	330.1
7	2017/01/01	22:33:24.000	1001	06A0A6	QTR812	35.55073	139.7756	31.0	330.1
8	2017/01/01	22:33:25.000	1001	06A0A6	QTR812	35.55084	139.7755	31.0	330.1
9	2017/01/01	22:33:27.000	1001	06A0A6	QTR812	35.55115	139.7753	31.0	330.1
10	2017/01/01	22:33:32.000	1001	06A0A6	QTR812	35.55167	139.7749	26.0	321.7

①データ取得日

②時刻

③ ICAO
HEX CODE
※航空機固有番号

④便名

⑤位置情報
(緯度、経度：10進法)

⑥水平速度
(ノット)

⑦機種の方位

図-1 ADS-B データの取得データの例



図-2 ADS-B データの受信装置 (一式)

2.2 ADS-Bデータの受信

ADS-Bデータの受信に必要な機器は、汎用のパーソナルコンピュータとFM波受信用のアンテナである。周波数は1,090MHzである。受信した電波をテキストデータに復調するためのプログラムコードが必要である (図-2)。

の策定のために検討されたものであり、国土交通省航空局の「滑走路端安全区域 (RESA) 対策の選定に関する技術検討会」(平成28年12月～平成29年3月)において参照されている³⁾。

同文献における滑走路端安全区域のリスク評価は、「滑走路からの逸脱する確率」に「滑走路から逸脱した場合における航空機の停止位置に関する超過確率」を乗じる形で評価されている。前者を「発生モデル」、後者を「ロケーションモデル」と呼称している。この概念を図式したものを図-3及び図-4に示す。

3. 滑走路端安全区域 (RESA) の安全性評価

3.1 既往の評価手法

(1) 既往の評価手法の概要

滑走路端安全区域の安全性評価手法に関する既往の文献としては、欧州航空安全機関 (EASA)²⁾が代表的である。同文献はEASAにおける滑走路端安全区域諸元の技術標準

まず、滑走路を逸脱する確率そのものを計算する。次に、滑走路におけるRESAの諸元 (長さ、幅) を所与とし、

RESA長を所与として…

$$\left[\text{リスク} \right] = \left[\text{発生モデル} \right] \times \left[\text{ロケーションモデル} \right]$$

$$\left[\text{リスク} \right] = \left[\text{滑走路逸脱の確率} \right] \times \left[\text{「逸脱時の停止位置>RESA長」の確率} \right]$$

図-3 リスク評価の概念

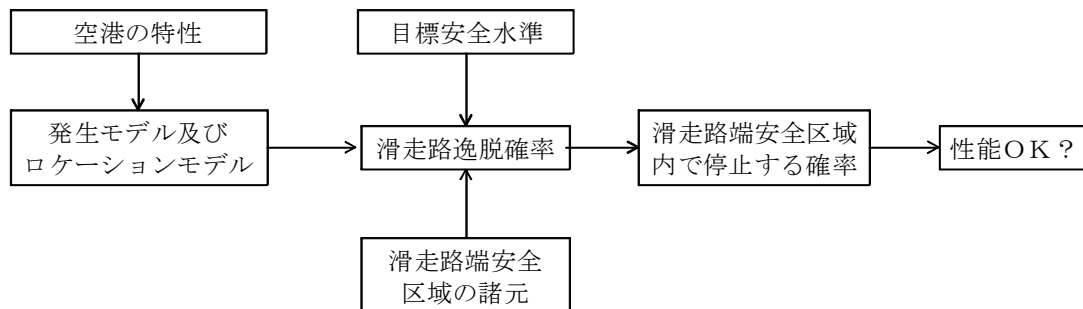


図-4 リスク評価の手順

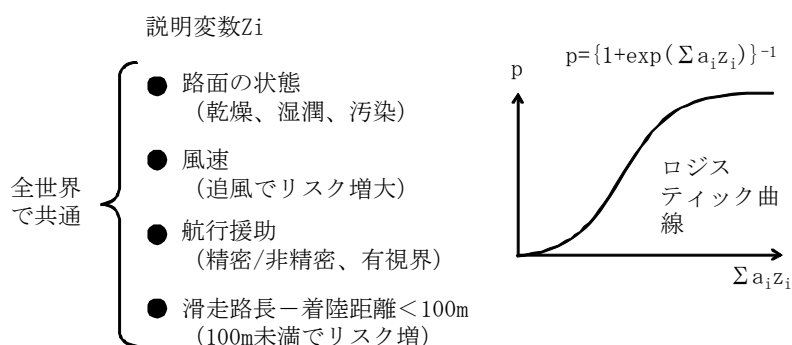


図-5 発生モデルの概念図

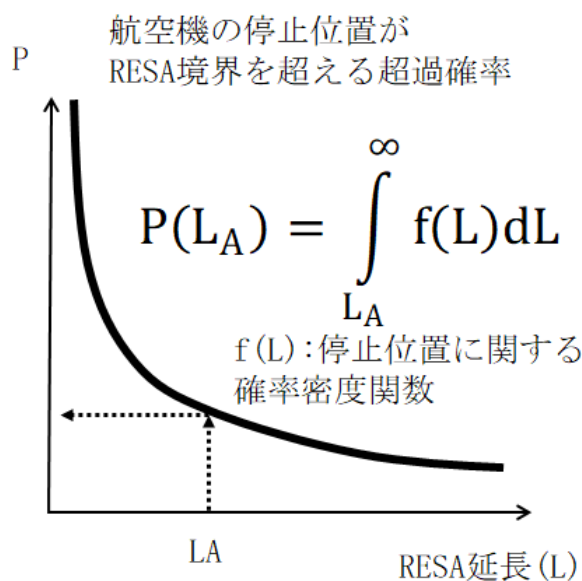


図-6 航空機停止位置に関する超過確率曲線 (イメージ)

滑走路端を逸脱する場合の超過確率を計算する。例えば、RESAが240mある場合、滑走路端を逸脱した航空機が滑走路端から240mを超過して停止する確率を計算する。

つまり、滑走路端安全区域のリスクは「滑走路端を逸脱する確率」×「滑走路端を逸脱した場合に所与のRESAの幅・長さを超過して停止する確率」を算定し、許容リスクと比較することにより評価している。

(2) 発生モデル

発生モデルは、世界の空港で生じたオーバーラン、アンダーシュートの事例をもとに、滑走路の状態が事故のリスクに及ぼす影響を評価するために検討されたモデルであり、ロジスティック曲線により表現される。概念図を図-5に示す。

ロジスティックス曲線の説明変数は、路面の状態（乾燥、湿潤、汚染）、風速（追風の場合、オーバーランのリスクが増大）、航行援助（精密／非精密、有視界飛行）、

滑走路長の余裕長さ（着陸距離と比較して100m以上の余裕があるかないか）が採択されている。

(3) ロケーションモデル

ロケーションモデルは、図-6のように、世界の空港で生じたオーバーラン、アンダーシュートの事例をもとに、航空機の停止位置の超過確率を推定するモデルである。なお、縦断方向の逸脱は、機材、滑走路の諸元・性状を区別せず、過去の事案における停止位置のみを変数として構築されている。

(4) 既往評価手法の課題

既往の評価手法を本邦の空港に適用する場合の課題について検討した。その結果、以下の3つの課題があることが分かった。

第一に、既往のロケーションモデルでは、滑走路停止位置の超過確率算定にあたり、滑走路の状態が全く考慮

されていないことである。B747-Classicに対応し滑走路長に余裕がある本邦に適用する、超過確率が安全側に過大評価となるおそれがあるものと史料される。

第二に、既往の評価手法では、大型機／小型機の閾値を、最大離陸重量 (MTOW) 5,670kgとしている。これに相当する機材は、ドルニエ228といった、我が国ではコミュニティ機に分類される機材である。滑走路逸脱は機材が大型になるほど、そのリスクは小さくなるものと報告されているが²⁾、ジェット機を主体とする本邦の航空市場においてそのままの数値を適用すると、安全側に過大評価となるおそれがあるものと史料される。

第三に、既往文献におけるリスク評価は、オーバーラン、アンダーシュートの事例が少ないこともあって、全世界を対象とした評価となっており、各国、各空港の個別事情が反映されない。本邦においては、機材の機齢が若いこと、パイロットの高度な技術といった事情が反映されておらず、本邦におけるリスクを安全側に過大に推計するおそれがあるものと史料される。

3.2 評価手法の提案

特定の空港、滑走路における航空機の飛行データのみを用いて評価することを提案する。これにより、滑走路長、空港、滑走路の気象条件や滑走路の摩擦係数、運航する航空機の態様といった個別空港の実情を、全世界一律でなく個々の空港・滑走路に固有のリスク評価を行うことができる。空港毎に飛来する機材構成の大小も反映されたリスク評価になるとともに、データ選択により機材サイズ別の分析を行えば、将来の航空市場の環境変化（本邦においては人口減少による航空需要・供給サービスの低減による機材の小型化）の反映を可能にすることができる。飛来する機材の機齢、エアライン毎の安全度といった要素も、対象空港・滑走路だけのデータにより分析することで、反映することができる。

評価手法を以下に記述するとともに、その手順を図-7に示す。

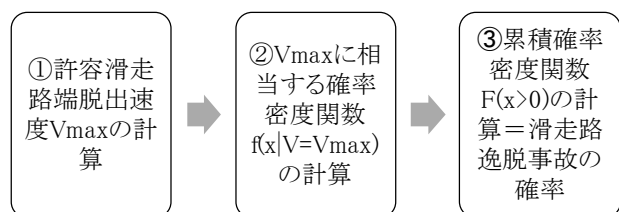


図-7 RESA性能評価手法のフロー図

① 分析対象とする空港・滑走路における滑走路端安全

区域及び過走帯の諸元をもとに、許容滑走路端脱出速度 V_{max} を算定する。 V_{max} 以下であれば、滑走路を滑走路延長方向に逸脱しても過走帯または滑走路端安全区域で停止することができる。RESA長・過走帯長と、滑走路端脱出速度 V_{max} の関係は、Transportation Research Boardの関係式4)を参照して、

$$V_{max} = \sqrt{14.1(S + L)}$$

とする。ただし、 S はRESA長 (m)、 L は過走帯長 (m) である。これは、一定の加速度で減速して停止するまでの距離と初速度の関係によるものと推定される。

- ② V_{max} に相当する速度での滑走位置に関する確率密度分布をADS-Bデータにより推定する。この確率密度関数を $f(x|V=V_{max})$ とする。このとき、 x は滑走路端を原点として、滑走路逸脱方向をプラス、手前側をマイナスとする。
- ③ 累積確率密度分布 F により $F(x>0)$ 、つまり、航空機が許容滑走路端脱出速度 V_{max} を超えて滑走路端を滑走する確率を計算する。

3.3 国内空港への試行

(1)適用対象空港および滑走路

適用の対象は国内T空港の α 滑走路着陸（北風運用時）のオーバーランとする。なお、 α 滑走路の滑走路延長は3,000m、過走帯長 L は60m、滑走路端安全区域長 S は40mである。

(2)適用の手順

図-8に示すとおり、以下のSTEPにより適用する。

STEP 1. 第2章の方法で取得した航空機の飛行データ (ADS-B) を利用する。本研究は、2017年1月1日～1月31日 (GMT) の間のデータのみを収集とした。

STEP 2. 許容される滑走路端脱出速度 V_{max} を算定する。T空港の場合、凡そ38ktとなる。国際民間航空機関 (ICAO) の第14附属書で標準と定められる滑走路端安全区域の長さは90mである。この場合における、許容滑走路端脱出速度 V_{max} は46ktとなる。本稿の検討では、安全性を厳しく評価する観点から10kt未満の単位を切り捨て、許容滑走路端脱出速度 V_{max} が30ktと40ktの両方の場合を評価し、滑走路端安全区域の長さを現行の40mから国際標準の90mに延長した場合のリスク低減の割合を評価する。

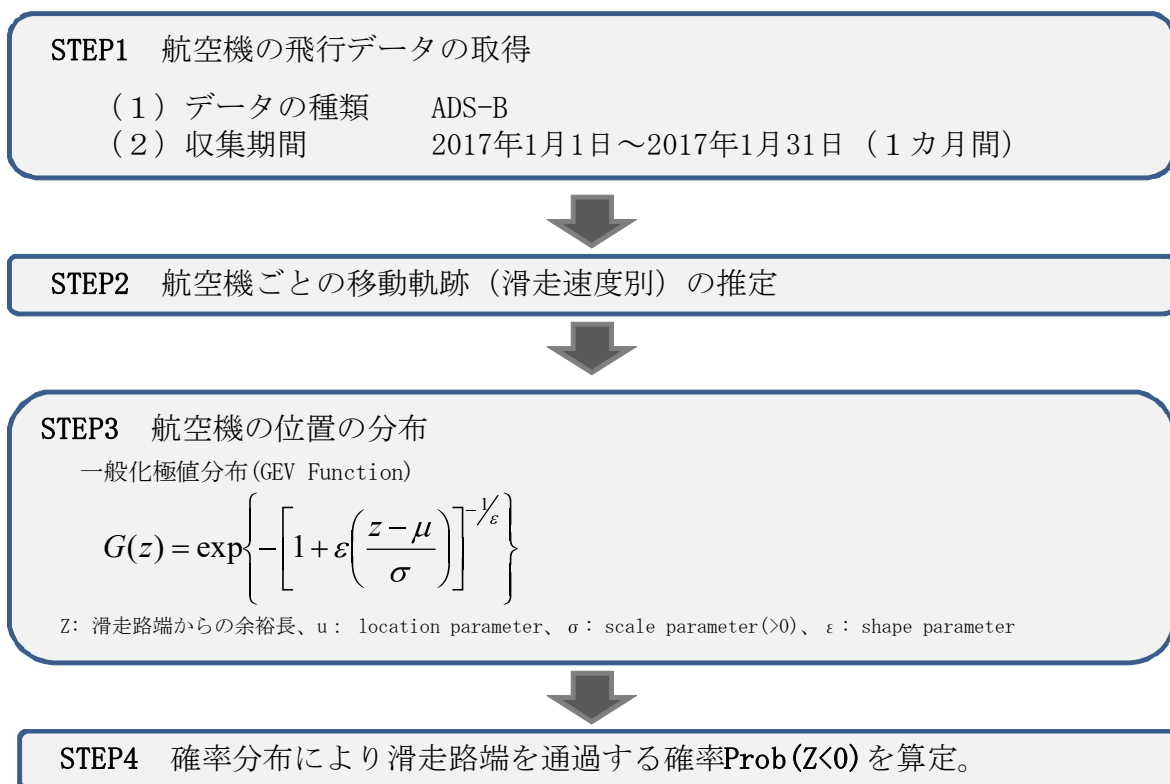


図-8 RESA 性能評価 (試行) の一連の手続き

STEP 3. 上記の前提の下で、航空機の位置の分布 (確率密度) を一般化極値分布 (GEV Function)

$$G(z) = \exp\left\{-\left[1 + \varepsilon\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\varepsilon}\right\}$$

により推定する。ただし、zは滑走路の余裕長 (航空機の位置から滑走路端までの距離 (m))、ε、μ、σは一般化極値分布のパラメータである。確率密度の推定に一般化極値分布 (GEV) を採用した理由は、アンダーシュートやオーバーランの発生確率が極めて小さいことを考えると、再帰性を考慮した分布とすることが望ましいと判断したことによる。

STEP 4. 得られた極値分布により、所定の速度で滑走路端を通過する確率を計算する。

(3)適用結果

a) 航空機の滑走位置の分布 (確率密度)

ADS-Bデータに基づき、許容滑走路端脱出速度Vmaxが30kt及び40ktの2ケースに対応する航空機の滑走位置の分布 (確率密度) を算定する。

しかしながら、ADS-Bデータ取得の頻度 (時間間隔) の関係上、Vmaxが30ktまたは40kt丁度となるデータの取得は必ずしもできない。

このため、本研究の検討では、航空機の水平速度が40kt以上60kt未満の航空機データをすべて取り出し、速度と滑走位置の関係を線形関係とみなし、速度が30kt及び40ktの滑走位置を推定することとした。この際、水平速度40kt以上60kt未満の閾値を設定した理由は以下である。

- ① 速度30kt以上で閾値を設定すると、高速脱出誘導路から脱出する航空機があること
- ② 速度40kt未満の領域では (減速の) 加速度の絶対値が小さく、30ktの確率密度の推定が不精確となる可能性があることと認められること
- ③ 速度70kt以上では、リバース・スラスト・システム (逆噴射装置) を使用することが通例であり、30ktおよび40ktの確率密度の推定が不精確となる可能性があることと認められること

速度が30kt及び40ktの滑走位置の推定は、上記の閾値により取得したデータを、緯度または経度を被説明変数、速度を説明変数とした最小二乗推定を行い、決定係数が0.95以上のもの、および、推定された30ktまたは40ktの滑走位置が滑走路にあるもののみを有効なデータとみ

なして、以降の推定を行うこととした。

b) 一般化極値分布の推定

上記で得た、30ktおよび40ktを許容滑走路端脱出速度とする際の滑走路位置の確率密度を、一般化極値分布(GEV Function)により推定した結果を表-1に示す。

有効データ数は、許容脱出速度を30ktとした場合は596、40ktとした場合は786であった。因みに1カ月間の北風運用・着陸は約4100回(ADS-Bを搭載しない飛行機に係る分

表-1 一般化極値分布(GEV)の推定結果

	30kt	40kt
μ	-724.2	-857.6
σ	98	92.1
ϵ	-0.13	-0.27
有効サンプル数	596	786
$F^{-1}(1 \times 10^{-7})$	-135m	-527m
[95%信頼区間]	[-415, -67]	[-580, -264]

を除く)である。有効データとなる割合は比較的小さいことには、留意が必要である。

許容脱出速度を30ktとしたときの形状パラメータ ϵ は -0.13と推定され、ワイブル分布とみなすことが妥当とされた。許容脱出速度を40ktとしたときの形状パラメータは -0.27と推定され、ワイブル分布とみなすことが妥当とされた。

c) 性能評価

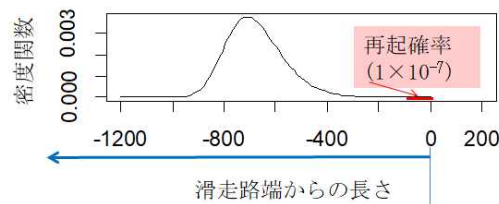
滑走路端をそれぞれの許容脱出速度を超えて滑走する確率を、推定された累積確率密度関数により推定することができる。これを推定した結果、許容滑走路端脱出速度が30ktの場合は、 8.4×10^{-17} 、許容滑走路端脱出速度が40ktの場合は0(ワイブル分布の定義域の外側)と推定された。この値が示す滑走路端安全区域の性能評価を、国際民間航空機関(ICA0)の目標安全水準との比較において試みた。

国際民間航空機関(ICA0)において、滑走路幅、着陸帯幅、誘導路幅の国際標準を定める際には、目標安全水準を定め、これに適合する施設の諸元を定めることが多い。滑走路逸脱に係る目標安全水準は 1×10^{-7} 、誘導路逸脱に係る目標安全水準は 1×10^{-6} としている。これに倣い、目標安全水準を 1×10^{-7} とする場合の試算を以下により行い、図-9のような結果となった。

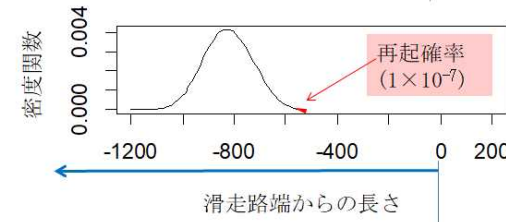
- ① 累積密度関数の逆関数 $F^{-1}(1 \times 10^{-7})$ により計算。
- ② 許容滑走路端逸脱速度が30ktの場合、滑走路端手前135mの滑走路位置となる。因みに、推定されたGEV

の各パラメータの信頼区間を考慮して推定すると、95%信頼区間で、滑走路端から最も近くなる場合、67m手前の滑走路位置となる。

- ③ 許容滑走路端逸脱速度が40ktの場合、滑走路端手前527mの滑走路位置となる。因みに、推定されたGEVの各パラメータの信頼区間を考慮して推定すると、95%信頼区間で、滑走路端から最も近くなる場合、264m手前の滑走路位置となる。



(a) 速度 30kt となる滑走路位置に係る確率密度関数



(b) 速度 40kt となる滑走路位置に係る確率密度関数

図-9 航空機位置分布(着陸50回あたり最大値)

3.4 評価手法・試行の評価

本評価手法は、対象空港における交通データのみに基づき滑走路端安全区域の評価を行うことを提案している。運航する機材の大小、滑走路や気象等の現地空港の状況を明示的にパラメータとして取り扱うわけではないが、評価に用いるデータそのものにこうした因子の影響が含まれることになり、空港の特性が反映されたものとなっている。

本稿は対象空港で取得したADS-Bデータを滑走路端安全区域の性能評価に適用する方法論の提案を第一義的に行ったもので、試行は2017年1月の僅か1か月のデータに基づくものであることについて、特に留意が必要である。一般に滑走路逸脱などの重大インシデントは、雨天・強風の荒天時、滑走路が湿潤状態にある、あるいは、気温が高く揚力が小さくなる等の状況下によって、より生じやすいと考えられている。一方、データを取得した2017年1月は、好天、乾燥あるいは低温であり、本試算が実際のリスクを安全側に過大に評価している可能性が否めない。実際の評価は、気象の影響を除外すべく、少なくとも

も1暦年以上のデータに基づいて行われるべきであるが、本稿では、方法論の提示を速報的に行うことをまず優先し、今後の課題としたい。

4. おわりに

ADS-Bデータは、運航中あるいは空港の地上走行時においても、位置、三次元の速度、運航情報を常時伝送していることから、滑走路端安全区域以外の空港計画分野の適用が期待される。

一例としては、航空機地上支援車両（GSE: Ground Service Equipment）の自動走行を空港において計画する場合におけるシミュレーションへの適用が考えられる。GSE車両の自動走行化を実現するためには、安全性および効率性の両面で、多岐にわたる関連事業者が合意可能な運用ルールを定めることが重要であり、大規模な社会実験に依らなくとも、運用ルール案を評価、比較考量するシミュレーション技術の必要性が高く、国土交通省航空局との連携の下、国土技術政策総合研究所において所要の研究を進めている⁵⁾。地上走行する航空機の増減によるGSE車両走行環境の変化を評価するための入力として、ADS-Bデータを取り込んでいくことを考えている。その他、駐機場計画の合理化や、高速離脱誘導路計画の合理化など、空港機能を強化に貢献できるものと考えている。

空港計画分野におけるADS-Bデータの利用は、マルチラテレーション（MLAT: 航空機のトランスポンダから送信される信号を3カ所以上の受信局で受信して、受信時刻の差から航空機等の位置を測定する監視システム）が導入されていない空港においても、低廉な導入コストによって適用可能であり、空港計画の更なる合理化を図る余地が大きい。国土技術政策総合研究所においては、関連する研究を進めていく予定である。

(2020年8月28日受付)

謝辞

本研究について、関西大学政策創造学部羽原敬二教授から貴重なご助言を頂戴した。ADS-Bデータの受信環境の整備・調整にあたっては、国土交通省航空局山田幸宏氏、国土交通省東京航空局川西和幸氏（いずれも元・国土交通省国土技術政策総合研究所空港計画研究室研究員）、株式会社シオ政策経営研究所の中神啓介氏、株式会社東洋信号通信社の西ヶ谷康明氏のご協力を頂戴した。深く感謝します。

参考文献

- 1) 情報通信審議会情報通信技術分科会 航空無線通信委員会報告 ADS-Bに係る無線設備の技術的条件（案）平成19年7月18日版
- 2) European Aviation Safety Agency: Study on models and methodology for safety assessment of Runway End Safety Areas (RESA), 2014.
- 3) 国土交通省航空局安全部空港安全・保安対策課, 安全滑走路端安全区域(RESA)対策の選定に関する技術検討会, 2017.
- 4) National Academies of Sciences Engineering, and Medicine: Improved Models for Risk Assessment of Runway Safety Areas. Washington, DC: The National Academies Press, 2011.
- 5) 黒田優佳, 高橋良正, 平野誠哉, 森井達也: 航空機地上支援車両(GSE)の自動走行シミュレーションモデルの開発, 国総研レポート2020, PP.91, 2020.