

大規模災害発生時の 航空機の安全な着陸に関する基礎的分析

藤井 涼¹・森崎 裕磨²・藤生 慎³・高山 純一⁴

¹ 学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: r9685@stu.kanazawa-u.ac.jp

² 学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: yki20@stu.kanazawa-u.ac.jp

³ 正会員 金沢大学准教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: fujii@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴ フェロー 金沢大学名誉教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: takayama@se.kanazawa-u.ac.jp

2018年9月6日3時7分59秒、北海道胆振東部地震が発生し、最大震度7を記録した。大規模停電と地震動による施設被害の影響で新千歳空港は運用不可能となり復旧まで時間を要した。高い安全基準が求められる航空分野において空港が被災した場合、空港施設のみならず航空機の運航にも大きな影響が生じる。そのため空港の災害対策の改善・向上が急務な課題であり、具体的方策を推進することが求められている。そこで本研究では、実際の航空機の航跡データである CARATS Open Data を用いて、災害発生を想定し、その直後における飛行中の各航空機の着陸する空港までの距離・位置関係といった飛行状況の把握を行った。さらに、出発時の必要搭載燃料量から発災時点での各航空機の航続可能距離を仮定し、ダイバート候補空港、及び空港と航空機の位置関係の把握を試みた。

Key Words: aviation network, disaster response capability, airport, vulnerability

1. 本研究の背景と目的

(1) 本研究の背景

近年、我が国では自然災害の多発化や被害の激甚化・多様化により、空港をはじめとする重要な交通インフラの機能に支障をきたすなど、国民生活や国民経済に多大な影響を与えている。近年の被災事例として2011年東北地方太平洋沖地震、平成30年台風21号、平成30年北海道胆振東部地震が要因となった空港被災が挙げられる。2018年9月4日の台風21号によって関西国際空港が浸水、停電の被害に合った。被災から3日間は全ての航空機が運航を停止し、全面的な復旧には17日を要した^{1,2)}。また、2018年9月6日3時7分59秒、北海道胆振東部地震が発生し、最大震度7を記録した。大規模停電と地震動による施設被害の影響で新千歳空港は運用不可能となった。一方で滑走路に異常は無く、航空機の運航機能の復旧により国内線は地震翌日の9月7日より運航再開、9日より通常運転、国際線は翌々日の9月8日より順次

運航を再開した³⁾。高い安全基準が求められる航空分野において空港が被災した場合、空港施設のみならず航空機の運航にも大きな影響が生じる。

国土交通省航空局は、空港の災害対策について、これまで「地震に強い空港のあり方」(2007年)及び「空港の津波対策の方針」(2011年)に基づき、各空港における地震・津波対策を進めてきた。しかし、前述した2例のように近年多発する自然災害による空港の被害を鑑み、新たな対策を講じる必要が生じた。そこで、2019年5月には対象を全国の空港とする「空港における自然災害対策に関する検討委員会」⁴⁾を設置した。この検討委員会では空港は早期の機能回復が必要であり、各空港共通の目指すべき目標として「72時間以内に復旧」を掲げている。

以上より、空港の災害対策の改善・向上は急務な課題であり、具体的方策を推進することで、大規模自然災害に強い空港づくりを目指している。

(2) 本研究の目的

前節で述べた被災事例や国土交通省の動きを踏まえ、本研究は大規模な自然災害が発生し空港が被災した場合において、空港の安全な運用・航空機の安全な離発着の継続の実現を目的とする。これらの実現のためにはダイバート（代替着陸空港）先の再選定や CIQ（Customs, Immigration, Quarantine）施設の整備などより効果的な対策の構築が求められる。一方、発災後のダイバート先の選定、CIQ の整備などといった対策を考えるうえでは、既往の空港の災害対策の状況や、空港の運用・航空機の運航状況の把握を行う必要があると考える。

したがって本研究では、災害が発生した場合を想定して飛行中の航空機がおかれる状況を精微に把握することを目的とした。分析にはオープンデータより得られる航跡データである CARATS Open Data（Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems）⁵⁾を活用し、段階的なデータ抽出を行った後に分析を行うこととする。分析を行うに際しての発災時刻、対象空港の選定など、分析の概要・仮定などは第 3 章において詳細に述べることとする。

さらに第 4 章では、第 3 章において抽出した航空機それぞれに着目し、航空機ごとのダイバート候補空港の把握を行った。分析を行う際の分析対象航空機の設定、分析の概要・手法などは第 4 章において詳細に述べることとする。

2. 既往研究の整理

本章では、本研究に関連する既往研究の整理を行う。本研究は、第 1 章にて述べたように、運航実績データを用いて発災時の航空機の飛行状況の把握という視点での分析を行った。そのため、整理を行った研究内容の詳細については分析内容に沿った「空港を防災の観点で着目した研究」・「運航実績データを活用した研究」とした。その後、既往研究を踏まえた本研究の位置付けを述べる。

(1) 空港を防災の観点で着目した研究

大規模な地震災害時あるいは地震後において、空港の果たす役割は、被災地への緊急物資輸送や救急医療の観点から非常に重要である。中澤・菅野⁶⁾は軟弱地盤上に建設された空港における滑走路を対象とし、地盤の液状化が滑走路へ及ぼす影響の把握、滑走路における合理的な液状化対策工法の検討および液状化後における滑走路機能について検討を行った。中島・中村⁷⁾は九州地方の臨海部空港を対象とし、複合災害を考慮した空港機能の信頼性を評価する方法の提案を行った。

(2) 運航実績データを活用した研究

航空機の実際の運航データを活用した研究はいくつか存在する。平田ら⁸⁾は成田空港と羽田空港を対象に飛行航跡データを用いて航空機の離着陸順序の実態と滑走路容量算定方式の離発着順序の前提（ランダム発生）との乖離について分析を行った。その結果、成田空港においては 1 本の滑走路を離発着共用で使用する場合に、処理効率の高い離着陸交互運用の発生確率がランダム仮定よりも有意に高く、羽田空港においても交差する滑走路において後方乱気流区分を考慮した離陸順序が処理効率の高い順序付けの発生確率がランダム値よりも同様に有意に高いことが明らかとなった。また、首都圏空港はさらなる機能強化が必要とされており、海外では従来の運用に工夫を加えた先進的な管制運用方式が多数実施されている。木下ら⁹⁾は、このような先進的管制運用方式を羽田空港などの大規模空港に導入した場合の効果を運用効率と社会的制約の双方から分析することを研究の長期的な目標とした。その長期的目標を達成するため、管制指示情報を用いて羽田空港到着機の合流作業が行われる T14 セクターにおける管制指示の実態や特性を定量的に分析した。さらに分析した管制指示の特性を反映させた空域シミュレータの開発を進め、先進的管制運用方式として Point Merge と呼ばれる方式を再現し、到着機の処理機数の観点から簡易的な分析を行い、Point Merge の到着機処理に関する効果を確認した。

(3) 既往研究を踏まえた本研究の位置付け

本研究は、大規模な自然災害が発生し空港が被災した場合において、空港の安全な運用・航空機の安全な離発着の継続の実現を目的とする。そのための基礎的な検討として、発災直後において、着陸する空港までの距離・位置関係といった各航空機の飛行状況の把握を行うものである。前節にて述べたように、運航実績データを活用した研究、空港を防災の観点で着目し、それぞれ個別で分析を行った研究は多数存在する。しかし、空港・航空機を防災の観点で着目し、実際の航空機の航跡データを用いて得た飛行実態と、個々の空港の情報を掛け合わせた研究は行われていない。そのため、実際の航空機の航跡データを用いて、発災直後において、着陸する空港までの距離・位置関係といった各航空機の飛行状況を基礎的に把握することは有意義であり本研究における新規性であると考えられる。

3. CARATS Open Data を用いた航空機の運航に関する分析

本章では、本分析において使用するデータと対象空港及び分析手法について述べる。図-1 に本分析における分

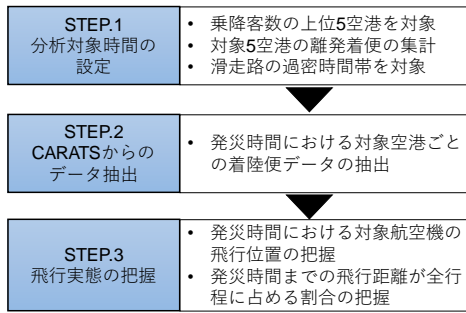


図-1 本分析における分析フロー

析手順を示す。STEP. 1 として対象空港の選定及び分析対象時間の設定を行った。STEP. 2 では CARATS Open Data を用いて災害発生想定時間における対象空港ごとの着陸便データの抽出を行った。そして、STEP. 3 では CARATS Open Data を用いて災害発生直後における航空機の位置関係、着陸する空港までの距離を算出した。また、発災時点において航空機が出発地からどの程度の航程を終えているのか（空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合）を算出した。これは、各航空機の残燃料に着目し、発災時の残燃料によって航続可能距離を算出することでダイバート先の選定につなげることが目的である。そのために本来、搭載燃料を正確に算出することが必要である。しかし、航空機は補備燃料（extra fuel）¹⁰ と呼ばれる天候状況などによって量が左右される燃料を搭載するため、個々の航空機の燃料について把握することは不可能である。そこで、空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合を代理指標として使用し、発災時の各航空機の燃料状況を考察する。

(1) 分析対象空港及び使用するデータの概要

本分析では、我が国に存在する空港の中で 2018 年における乗降客数上位 5 空港¹¹⁾、東京国際空港・成田国際空港・関西国際空港・福岡空港・新千歳空港の各空港を対象とした。これは、大規模な災害が発生したと仮定した際に、多くの航空機が前述した 5 空港に向けて飛行中であることから空港が被災したときの影響が大きく、緊急的にダイバート先の選定などの対策を講じる必要があると考えたため本研究における分析対象とした。また、災害が発生した時点で管制機能が失われた場合や滑走路が離発着できない場合を仮定し、発災時点において飛行中であり、かつ着陸予定の空港が前述した 5 空港のいずれかの空港である航空機を対象とした。

また、本分析では使用データとして CARATS Open Data（表-1）を用いることとする。CARATS は Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems の略であり「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン」⁹⁾として 2025 年に向けて目指すべき目標、変革の方向性を国土交通省航空局が示したものである。CARATS Open Data のデ

表-1 CARATS Open Data の概要¹²⁾

期間	2012年度から2015年度の奇数月の1週間（計24週間）
含まれる便数	のべ約64万便の航跡データのべ約14.8万便（2012）、15.7万便（2013）、16.4万便（2014）、17.1万便（2015）
データソース	レーダーデータ（航空路管制、羽田空港ターミナル管制（2013～）ADS-Cデータ等（洋上管制 2015～）飛行計画データ
対象範囲	日本が管轄する福岡FIR（レーダー管制空域・全域）
対象便	計器飛行方式による定期便（全体の約93%、軍用機、自家用機などは対象外）
データ形式	約10秒間隔、時系列のCSV形式（洋上便は約1分間隔）（1時間分のデータ → 1便あたり約360行）



図-2 CARATS Open Data のデータ構造¹²⁾

ータ構造は図-2のようになっている。今回使用した 2013 年度のデータには 15.7 万便のフライトデータが存在し、これは日本のフライトデータの約 93% をカバーしている。各航空機の離陸から着陸までの航跡が 10 秒間隔のポイントデータとして記録されている。緯度・経度が記録されているため、任意の時間での航空機の位置を正確に把握することが可能である。しかし、便名に関してはデータ上で割り振った仮想便名を採用しているため特定は不可能である。なお、後述するが本研究における分析は、2013 年 3 月 7 日時点のデータを用いている。しかし、本分析で行った航空機のデータ抽出手法はデータ期間等に依らず抽出を行うことが可能である。

(2) 分析手法に関する概要

本分析では、各空港で最も離発着機が多い時間帯に災害が発生するという仮定の下で航空機飛行状況の把握に関する分析を行うものとする。そこで本節では、空港ごとの分析対象時間の設定方法、及び CARATS Open Data の全航跡データから各空港に関する航跡データ抽出方法について述べる。

a) 分析対象時間の設定方法

各空港のホームページ^{13),14),15),16),17),18)}を参照し 2019 年 11 月 2 日の時刻表から国際線、国内線それぞれ 1 時間ごとの出発便、着陸便数を集計することにより各空港で最も離発着機が多い滑走路の過密時間帯を算出した。一例として東京国際空港の離発着便集計結果を図-3に示す。実際の離陸、着陸時間と定刻には差異が生じているが全て

の航空機が定刻で運航しているものとした。また 1 時間当たりの集計数が同数であった場合、本分析では災害発生時の対応がより困難であると考えられる夜間に近い時間帯を採用した。例として東京国際空港の場合、9 時・10 時・19 時台が合計 80 便で同数となったため 19 時と設定している。なお、同様の手法で新千歳空港・成田国際空港・関西国際空港・福岡空港を対象に分析対象時間を算出したところ、新千歳空港では合計 39 便で 15 時、成田国際空港では合計 64 便で 17 時、関西国際空港では合計 43 便で 17 時、福岡空港では 9 時・14 時・15 時台が合計 34 便で同数となったため 15 時とした。

b) 対象航空機特定のためのデータ抽出方法

図-4 に本分析で用いたデータ抽出方法の手順を示す。東京国際空港を例に抽出方法の手順の詳細を述べる。東京国際空港の分析対象時間は 19 時である。STEP. 1 では 19 時以降の航跡データの中で東京国際空港から半径 3km の範囲に位置する航跡データを抽出した。一定の時間の範囲で高度を比較し着陸機を判別する際に充分であると考え、空港から半径 3km を閾値として設定した。抽出した航跡データからフライトナンバーを割り出し、便数の把握を行ったところ 139 便であった。STEP. 2 では STEP. 1 で得た 139 便のフライトナンバーごとに半径 3km の範囲で最も早い時間の高度と最も遅い時間の高度の比較を

行った。その結果、139 便を離陸・着陸・通過に判別することが可能となり、東京国際空港への着陸便は 49 便であった。そして、STEP. 3 では STEP. 2 で得た 49 便がそれぞれ持つポイントデータの最も早い時間が 19 時 00 分 00 秒から 19 時 00 分 59 秒の間（1 分間を災害発生想定時間とみなして分析を行うため）であった場合、災害発生想定時間である 19 時に東京国際空港に向けて飛行中であるとした。その結果、今回の分析で対象とする航空機は 39 機となった。

本分析で使用した CARATS Open Data は 2013 年 3 月 7 日の全航跡データである。本分析には CARATS Open Data と空港の位置情報の表示に ArcGIS を用いた。同様の手法を用いて新千歳空港・成田国際空港・関西国際空港・福岡空港でのデータ抽出を行い、空港ごとの分析対象とする災害発生想定時間とデータ抽出の結果を表-3 に示す。①は図-4 の STEP. 1 で得られた発災想定時間の 3 時間以内に対象空港から 3km に航跡データを持つ航空機数、②は STEP. 2 で得られた①の航空機の中で対象空港に着陸する航空機を示す。③は STEP. 3 で得られた②の航空機の中で発災想定時間時点で飛行中の航空機を示している。対象航空機抽出のためのデータ抽出の結果、STEP. 3 で得られた各空港の対象航空機は新千歳空港が 7 機、成田国際空港では 19 機、関西国際空港では 12 機、福岡空港では 4 機であった。

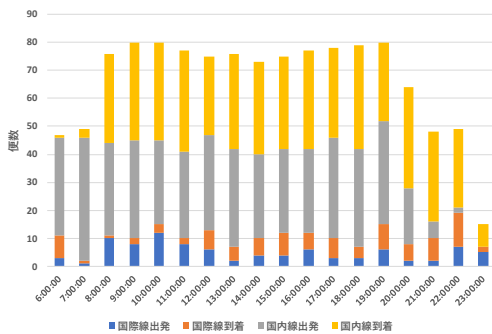


図-3 2019年11月2日における東京国際空港の離発着便数 (国内線・国際線) ^{15),16)}

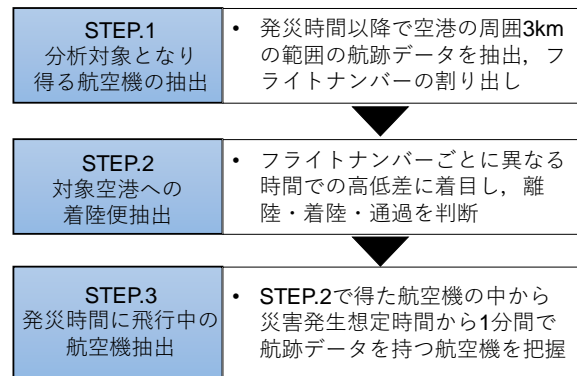


図-4 対象航空機抽出のためのデータ抽出の手順

表-2 対象航空機抽出のためのデータ抽出結果

対象空港	発災想定時間	①. 発災想定時間の3時間以内に対象空港から3kmに航跡データを持つ航空機	②. ①の航空機の中で対象空港に着陸する航空機	③. ②の航空機の中で発災想定時点で飛行中の航空機
新千歳空港	15:00	57	14	7
成田国際空港	17:00	139	49	19
東京国際空港	19:00	176	106	39
関西国際空港	17:00	78	40	12
福岡空港	15:00	79	19	4

(単位：便)

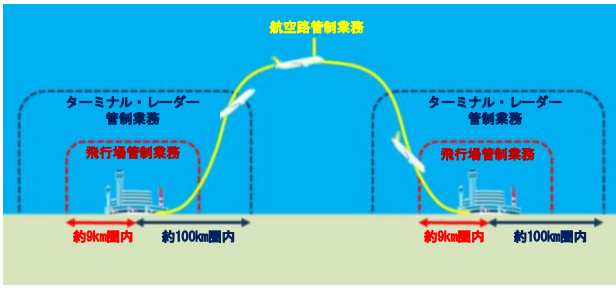


図-5 日本における管制業務等概念図¹⁹⁾

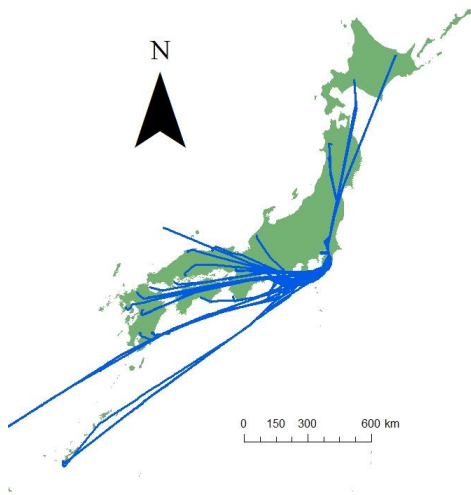


図-6 東京国際空港における対象航空機 39機の
全航跡データ

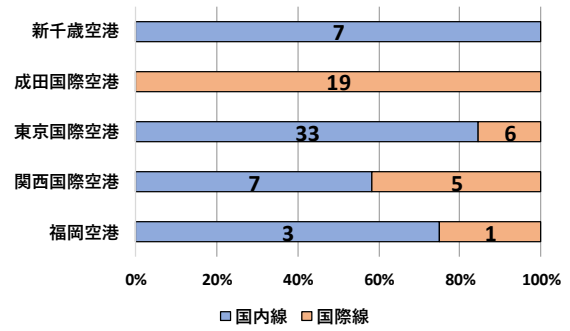


図-7 対象空港における国内線・国際線の内訳

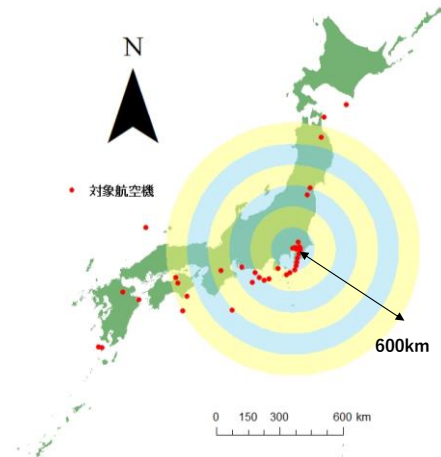


図-8 発災想定時間 19時における対象航空機 39機の
全飛行位置 (東京国際空港)

(3) 災害発生時点における航空機の飛行状況の把握

本節では、空港・航空機を対象とした分析を行ううえで重要である日本の管制・航空交通管理業務等の概要を整理した。その後、対象航空機の航跡情報の抽出結果と、発災直後において、着陸する空港までの距離・位置関係といった各航空機の飛行状況の把握に関する分析結果を述べる。

a) 日本の管制・航空交通管理業務等の概要

日本における管制業務等の概念図を図-5に示す。「ターミナル・レーダー管制」では空港から出発・到着する航空機をレーダーで監視し、飛行経路や高度等の管制指示を発出している。「飛行場管制」では管制塔から目視等で航空機の位置を確認し、滑走路や離発着の順番や時機等の管制指示を発出している。各空港の飛行場管制業務は空港の周囲の半径約9km圏内と定められている。着陸の場合は「ターミナル・レーダー管制」から「飛行場管制」へ、離陸の際は、逆に「飛行場管制」から「ターミナル・レーダー管制」へと管制業務が受け継がれていく。

b) 対象航空機的全航跡情報の抽出

前節にて述べたデータ抽出により得られた対象航空機的全航跡データを、日本地図上に表示したものを東京国際空港を例に図-6に示す。空港ごとに全航跡データから国内線・国際線の判別を行い、国内線に関しては出発空港の割り出しも行った。ただし CARATS Open Data は日本の飛行情報区内の航跡データであるため日本海、もしくは太平洋上で航跡データが途切れているものを国際線と判別した。また各空港の国内線、国際線の内訳を図-7に示す。新千歳空港では対象航空機 7機全てが国内線、成田国際空港では対象航空機 19機が全て国際線、東京国際空港では対象航空機 39機の内訳が国内線 33機、国際線 6機となった。また関西国際空港では対象航空機 12機の内訳が国内線 7機、国際線 5機、福岡空港では対象航空機 4機の内訳が国内線 3機、国際線 1機となった。

以上のように、CARATS Open Data を活用し、前節にて述べた段階的なデータ抽出を行うことによって、航跡から国内線・国際線の判別も可能となっている。

c) 災害発生時点における飛行位置の把握

災害発生想定時点における対象航空機の飛行位置データを日本地図上に表示したものを、東京国際空港を例に図-8に示す。日本地図上には各空港を中心として半径

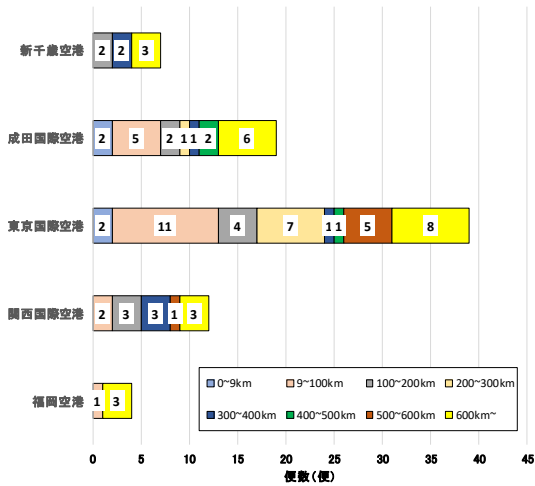


図-9 各空港における発災想定時点での飛行位置

100km ごとに 600km までのバッファを作成し、災害発生想定時点での対象航空機の飛行位置の把握を試みた。空港から半径 600km の範囲はダイバート選定の際の一つの基準となっている。なお、前項で述べたように各空港が担当する飛行場管制業務は空港の周囲の半径 9km の範囲である。半径 9km の範囲に災害発生想定時点において、既に進入している航空機の把握のため空港から半径 9km にもバッファを作成した。これらの航空機は着陸空港の「ターミナル・レーダー管制」から既に「飛行場管制」に受け継がれ管制官の目視等による管制指示によって運航する状態である。

また、対象空港ごとに各バッファ内に存在する航空機を集計した(図-9)。新千歳空港では 15 時時点で 9km から 100km の範囲に 2 機、成田国際空港(17 時時点)と東京国際空港(19 時時点)ではそれぞれの管制圏内に 2 機ずつ存在し、東京国際空港ではさらに 9km から 100km の範囲に 11 機が飛行中である。関西国際空港では 17 時時点で 9km から 100km の範囲に 2 機が存在し、福岡空港では 15 時時点で対象航空機 4 機のうち 3 機が空港から 600km 以上離れた地点を飛行中であった。

d) 災害発生時点における各航空機の航程状況

本分析は、各航空機の搭載燃料に着目し、発災時の残燃料によって航続可能距離を算出することでダイバート先の選定につなげることが目的である。残燃料は航空機の安全な着陸を考える上で非常に重要である。そのために本来、搭載燃料を正確に算出することが必要であるが、個々の航空機の燃料について把握することは不可能である。そこで、空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合 d/L (以下、飛行距離の割合)(図-10)を代理指標として使用し、発災時の各航空機の燃料状況を考慮した把握を行う。本分析により得られた航跡データより、各航空機が災害発生想定時間までに飛行した距離と各航

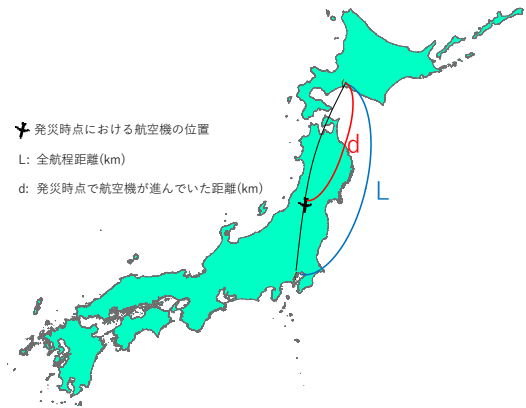


図-10 空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合

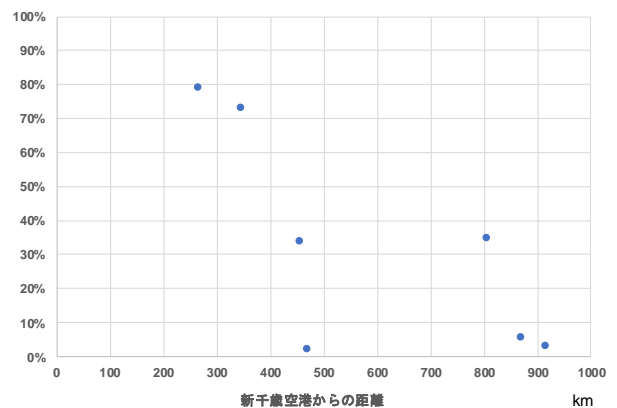


図-11 対象航空機ごとの空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合(新千歳空港)

空機の出発空港から着陸空港までの距離を算出した。その結果、前述した空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合の算出が可能となった。ただし、本分析では出発空港の割り出しが不可能であった国際線に関しては除外し国内線のみに関して分析を行った。本項では対象航空機が全て国際線であった成田国際空港を除いた 4 空港の分析結果を空港ごとに述べる。

a) 新千歳空港

新千歳空港の対象航空機 7 機の空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合を図-11 に示す。飛行距離の割合が 10% に満たない 3 機の中で 400~500km の範囲に位置する航空機の出発空港は岩手県の花巻空港、その他の 2 機は東京国際空港が出発空港であった。これら 3 機は災害発生想定時間が離陸直後であり、飛行距離の割合が 10% に満たないことから残燃料も充分である。したがって、出発空港に戻るなどの対策をとることが可能であり比較的安全であると考えられる。

b) 東京国際空港

東京国際空港の対象航空機 33 機の空港間飛行距離に

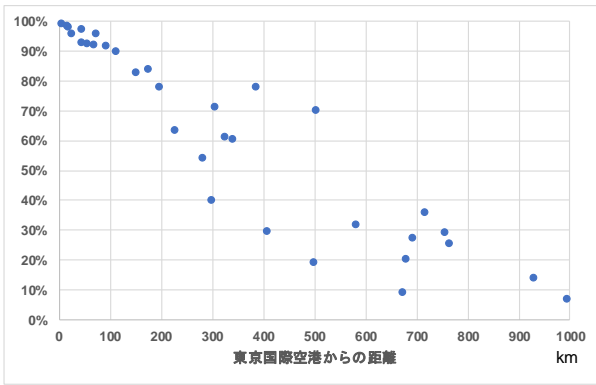


図-12 対象航空機ごとの空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合（東京国際空港）

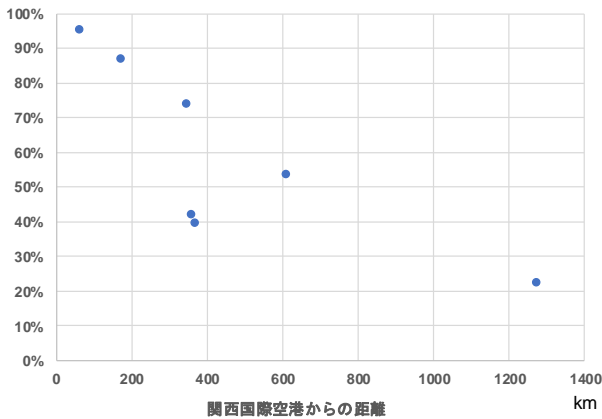


図-13 対象航空機ごとの空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合（関西国際空港）

占める発災時点の飛行距離の割合を図-12に示す。管制塔の担当範囲である半径 9km に 2 機が存在し、半径 100km まで広げると 13 機が飛行中である。これらは既に東京国際空港の管制官の管制下、もしくはは災害発生想定時間直後に東京国際空港の管制圏に進入する予定の航空機である。飛行距離の割合は 90% を越えており、残燃料もわずかといえる。したがって、管制機能が一時的に失われた場合、管制システムを失い非常に危険な状態であることに加え、残燃料の観点からも早急な対策が必要であるといえる。

c) 関西国際空港

関西国際空港の対象航空機 7 機の空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合を図-13に示す。今回作成した飛行実態のグラフは全ての空港に共通して各ポイントが比較的右下がりの直線上に位置し、着陸空港からの距離と飛行割合は比例関係にあるといえる。右下がりの直線の左下の範囲の 2 機は関西国際空港までの距離は短い到着態勢には入っておらず飛行距離の割合も 50% 未満のため燃料の残量も充分でありダイバート先への着陸など安全対策をとることが可能であると考えられる。2 機の出発空港は東京国際空港と長崎空港であった。一

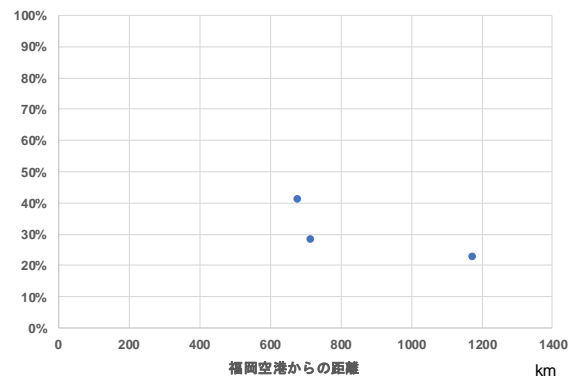


図-14 対象航空機ごとの空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合（福岡空港）

方で、関西国際空港の例には存在しないが右下がりの直線より右上の範囲に航空機が存在する場合について述べる。上記の範囲に位置する航空機は着陸空港までの距離を比較的残しているが、飛行距離の割合は大きく、燃料の残量が少ないと考えられる航空機であり、早急な対策が必要であると考えられる。また、当該範囲には総飛行距離が長く、今回は分析対象外とした国際線の航空機が多く位置すると考えられる。したがって、使用される航空機が比較的大きなものが考えられるため、滑走路の長さや CIQ 施設の有無などを考慮したダイバート先の選定などの対策が必要であると考えられる。

d) 福岡空港

福岡空港の対象航空機 3 機の空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合を図-14に示す。3 機とも福岡空港まで比較的距離があり飛行距離の割合も 50% 未満であるため燃料の残量も充分であり比較的安全であると考えられる。

4. 災害発生時点における飛行位置からのダイバート候補空港の選定に関する分析

本章では、災害発生時の各航空機のダイバート候補空港の把握を目的として分析を行った。本分析で対象とする航空機の概要、及び分析手法・分析結果について述べる。図-15に本分析における分析手順を示す。STEP. 1として、対象航空機の設定を行った。第 3 章で行った CARATS Open Data からの航跡データ抽出結果を用いた。ただし、第 3 章にて算出した飛行割合が 50% 未満の航空機は発災時、出発空港へ引き返しての緊急着陸も可能であるとして今回の分析対象から除外した。また、出発時点での到達可能距離を算出することは、航空機の燃料を正確に把握することが出来ないため不可能である。そこで、STEP. 2 では、各航空機の出発時点での到達可能距

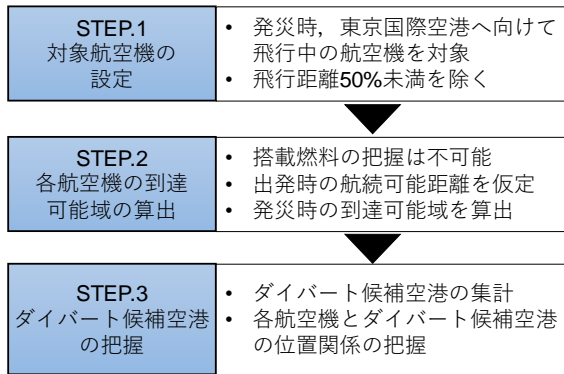


図-15 本研究における分析フロー

離を 4 段階で仮定し、発災時点での航続可能距離を算出した。そして、STEP.3 では、各航空機のダイバート候補空港の集計、各航空機とダイバート候補空港の位置関係の把握を行った。

(1) 分析対象航空機の概要

本分析では、第 3 章で CARATS Open Data から抽出した航空機の中から、東京国際空港へ向けて飛行中の航空機を対象とした。表-3 に本分析における対象航空機の概要を示す。第 3 章にて、航跡データから各航空機の出発空港を特定した。また出発空港と東京国際空港間の距離（空港間距離）、発災時点の飛行位置から東京国際空港までの距離（残距離）を集計し、飛行割合を算出した。飛行割合は、発災時点において、航空機が出発空港からどの程度の航程を終了しているのか（空港間距離に占める発災時点までの飛行距離の割合）を示す。ただし、飛行割合が 50% に満たない航空機は出発空港に引き返しての緊急着陸が可能であると仮定し、それらを除いた表-3 の 21 機を対象として分析を行った。また、21 機的全航跡データと出発空港を日本地図上に表示したものを図-16 に示す。各航空機の飛行経路の把握が可能である。

(2) 分析手法に関する概要

本分析では、大規模災害発生を仮定し、飛行中の各航空機のダイバート候補空港の把握、及び航空機と空港の位置関係の把握を目的に分析を行った。そこで本節では、各航空機の発災時点での飛行到達可能域の算出方法、及びダイバート候補空港の抽出方法について述べる。

a) 対象航空機の飛行到達可能域の把握

本分析は発災時点における各航空機の航続可能距離を把握することで、ダイバート候補空港の集計を行うことが目的である。そのためには本来、出発時点での搭載燃料を把握し、発災時点での残燃料を算出することが必要である。しかし、航空機は補備燃料（extra fuel）¹⁰ と呼ばれる天候状況などによって量が左右される燃料を搭載す

表-3 本分析における対象航空機

No	FLTNo	出発空港	飛行割合	空港間距離	残距離
1	FLT2556	新千歳空港	98.04%	866	17
2	FLT2647	那覇空港	97.50%	1679	42
3	FLT2670	那覇空港	95.92%	1715	70
4	FLT2748	那覇空港	77.94%	1736	383
5	FLT2775	新千歳空港	92.23%	862	67
6	FLT2779	福岡空港	98.75%	1043	13
7	FLT2781	那覇空港	70.20%	1678	500
8	FLT2798	熊本空港	91.83%	1090	89
9	FLT2801	鹿児島空港	90.08%	1109	110
10	FLT2823	福岡空港	83.99%	1074	172
11	FLT2861	大館能代空港	92.81%	570	41
12	FLT2870	鳥取空港	92.61%	717	53
13	FLT2875	広島空港	82.83%	868	149
14	FLT2883	岩国飛行場	78.11%	891	195
15	FLT2884	福岡空港	71.52%	1064	303
16	FLT2894	小松飛行場	99.44%	533	3
17	FLT2895	新千歳空港	60.61%	858	338
18	FLT2906	大阪国際空港	95.99%	549	22
19	FLT2941	出雲空港	61.32%	835	323
20	FLT2956	関西国際空港	63.52%	614	224
21	FLT2977	南紀白浜空港	54.17%	611	280

(単位: km)

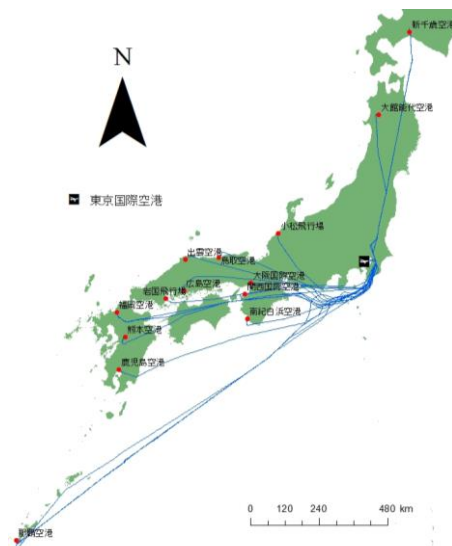


図-16 対象航空機 21 機的全航跡と出発空港

るため、個々の航空機の燃料について正確に把握することは不可能である。そこで本分析では、出発時点での航続可能距離を 4 段階で仮定し、発災時点での各航空機の飛行到達可能域を算出した。

航空機が出発時に携行しなければならない燃料の量（必要搭載燃料量）は、航空法施行規則第 153 条²⁰に定められている。その区分の中で本分析の対象である「航空運送事業の用に供するタービン発動機を装備した飛行機、かつ計器飛行方式により飛行しようとするものである、代替空港等を飛行計画に表示するもの」の燃料は次に掲げる燃料の量のいずれかの多い量と定められている。

- ❖ 着陸地までの飛行を終わるまでに要する燃料の量に、当該着陸地から代替空港等までの飛行を終わるまでに要する燃料の量、当該代替空港等の上空450メートルの高度で30分間待機することができる燃料の量及び不測の事態を考慮して国土交通大臣が告示で定める燃料の量を加えた量
- ❖ 着陸地までの航路上の地点を經由して当該地点において発動機が不作動の場合又は飛行機の与圧を維持する機能が損なわれた場合に着陸に適した空港等までの飛行を終わるまでに要する燃料の量のうち最も多い量に、当該空港の上空450メートルの高度で15分間待機することができる燃料の量を加えた量。

さらに運航規程審査要領細則²¹⁾の運航管理の基準、必要搭載燃料の欄に以下のように定められている。

- ❖ 規則第153条に規定された量以上の量を搭載しなければ出発させてはならないこと。また、燃料量の算定の区分（目的地までの燃料、目的空港等から代替空港等までの燃料、代替空港等上空で待機のための燃料等）及び算定方法が適切なものであること。
- ❖ 規則第153条に規定された「不測の事態」を考慮する燃料の量として、「不足の事態を考慮して航空

機の携行しなければならない燃料の量を定める告示」（平成12年9月18日運輸省告示第319号）²²⁾に基づき、以下に掲げる燃料の量のうちいずれか多い量が搭載されること。

- イ) 着陸地までの飛行を終わるまでに要する燃料の量の5%に相当する燃料の量
- ロ) 着陸地の上空450メートルの高度で5分間待機することができる燃料の量

上記2例の燃料量のうちロ)は、使用機体に燃料量が依存するため本分析では考慮することが不可能である。本分析は災害発生により当初の着陸空港が離発着不能になる不測の事態を想定している。そのため、イ)の着陸地までの飛行を終わるまでに要する燃料の量の5%に相当する燃料の量を考慮した分析を行うこととした。ただし、航空機の燃料の消費率は離陸から着陸まで一定であると仮定した。

先述したように、本分析では、航空機が搭載する最少燃料量は「空港間距離に加えて、空港間距離の5%の距離を飛行可能な燃料量」とであると仮定した。さらに比較のためイ)の5%を10%、15%、20%に変化させて分析を行った。

初めに、各航空機の出発空港と東京国際空港間の距離（空港間距離）の5%、10%、15%、20%の距離を算出した。それらを各航空機の発災時点での飛行位置から東京国際空港までの距離（残距離）に加えることで、4段階の発災時点における飛行到達可能域を航空機ごとに仮定した。表-4に各航空機の発災時点における飛行到達可能

表-4 対象航空機の発災時点における飛行到達可能域

No	FLTNo	出発空港	空港間距離	残距離	残距離+5%	残距離+10%	残距離+15%	残距離+20%
1	FLT2556	新千歳空港	866	17	60.3	103.6	146.9	190.2
2	FLT2647	那覇空港	1679	42	125.95	209.9	293.85	377.8
3	FLT2670	那覇空港	1715	70	155.75	241.5	327.25	413
4	FLT2748	那覇空港	1736	383	469.8	556.6	643.4	730.2
5	FLT2775	新千歳空港	862	67	110.1	153.2	196.3	239.4
6	FLT2779	福岡空港	1043	13	65.15	117.3	169.45	221.6
7	FLT2781	那覇空港	1678	500	583.9	667.8	751.7	835.6
8	FLT2798	熊本空港	1090	89	143.5	198	252.5	307
9	FLT2801	鹿児島空港	1109	110	165.45	220.9	276.35	331.8
10	FLT2823	福岡空港	1074	172	225.7	279.4	333.1	386.8
11	FLT2861	大館能代空港	570	41	69.5	98	126.5	155
12	FLT2870	鳥取空港	717	53	88.85	124.7	160.55	196.4
13	FLT2875	広島空港	868	149	192.4	235.8	279.2	322.6
14	FLT2883	岩国飛行場	891	195	239.55	284.1	328.65	373.2
15	FLT2884	福岡空港	1064	303	356.2	409.4	462.6	515.8
16	FLT2894	小松飛行場	533	3	29.65	56.3	82.95	109.6
17	FLT2895	新千歳空港	858	338	380.9	423.8	466.7	509.6
18	FLT2906	大阪国際空港	549	22	49.45	76.9	104.35	131.8
19	FLT2941	出雲空港	835	323	364.75	406.5	448.25	490
20	FLT2956	関西国際空港	614	224	254.7	285.4	316.1	346.8
21	FLT2977	南紀白浜空港	611	280	310.55	341.1	371.65	402.2

(単位: km)

域の集計結果を示す。残距離+5%, +10%, +15%, +20%は、それぞれ空港間距離の 5%, 10%, 15%, 20%の距離を残距離に加算した数値である。ただし表-4 が示すように、出発空港が同一であっても空港間距離に差異が生じている。これは、CARATS OpenData より得られる航跡データの、各航空機の最初と最後のポイントデータから空港間距離を算出したためである。本分析では、出発空港が同一であっても航空機ごとに算出した空港間距離



図-17 FLT2556 (新千歳空港発)

を採用して分析を行った。

b) ダイバート候補空港の抽出方法

各航空機のダイバート候補空港の把握および航空機と空港の位置関係の把握のため、対象航空機や空港を日本地図上に表示して整理した。新千歳空港出発の航空機を例に図-17 に示す。対象航空機の飛行位置は第 3 章にて求めた災害発生時点における飛行位置と同一である。また、対象航空機を中心として 4 段階のバッファを作成した。4 段階のバッファは内側から順に残距離+空港間距離の 5%, 10%, 15%, 20%の距離を示している。バッファ内の空港の集計結果については次節にて詳細に記述することとする。

(3) ダイバート候補空港に関する分析結果

本節では、ダイバート候補空港の集計結果、及び飛行到達可能域ごとの考察結果について述べる。

a) ダイバート候補空港の集計結果

前節にて示した対象航空機とダイバート候補空港の図から、4 段階のバッファごとのダイバート候補空港数の集計結果を表-5 に示す。飛行割合が小さいほど残距離+5%圏内に位置する空港が多いことが分かる。また、ダイバート候補空港ごとの対象航空機数の集計結果を付録図-1 に示す。当初の目的地である東京国際空港に近い成田国際空港・調布飛行場・百里飛行場・大島空港の 4 空港は、全ての対象航空機のダイバート候補空港となった。一方で、飛行割合が小さく東京国際空港まで比較的距離

表-5 4段階のバッファごとのダイバート候補空港数

No	FLTNo	出発空港	飛行割合	ダイバート候補空港数			
				残距離+5%圏	残距離+10%圏	残距離+15%圏	残距離+20%圏
1	FLT2556	新千歳空港	98.04%	2	3	4	9
2	FLT2647	那覇空港	97.50%	4	9	13	22
3	FLT2670	那覇空港	95.92%	6	10	16	22
4	FLT2748	那覇空港	77.94%	36	41	46	54
5	FLT2775	新千歳空港	92.23%	3	4	6	10
6	FLT2779	福岡空港	98.75%	2	4	5	10
7	FLT2781	那覇空港	70.20%	42	52	59	63
8	FLT2798	熊本空港	91.83%	7	8	11	14
9	FLT2801	鹿児島空港	90.08%	7	9	11	14
10	FLT2823	福岡空港	83.99%	9	12	14	19
11	FLT2861	大館能代空港	92.81%	3	3	4	4
12	FLT2870	鳥取空港	92.61%	3	4	5	9
13	FLT2875	広島空港	82.83%	9	9	11	13
14	FLT2883	岩国飛行場	78.11%	10	12	14	18
15	FLT2884	福岡空港	71.52%	22	27	31	37
16	FLT2894	小松飛行場	99.44%	1	1	2	4
17	FLT2895	新千歳空港	60.61%	17	19	26	28
18	FLT2906	大阪国際空港	95.99%	2	3	3	4
19	FLT2941	出雲空港	61.32%	23	28	31	35
20	FLT2956	関西国際空港	63.52%	12	13	17	19
21	FLT2977	南紀白浜空港	54.17%	20	20	24	24

(単位: 個)

を残している場合は出発空港によってダイバート候補空港が異なることが明らかとなった。

b) 4段階の飛行到達可能域ごとの考察

本分析では、各航空機の出発空港と東京国際空港間の距離（空港間距離）の 5%、10%、15%、20%の距離を算出した。それらを各航空機の発災時点での飛行位置から東京国際空港までの距離（残距離）に加えることで、4段階の発災時点における飛行到達可能域を航空機ごとに仮定した。本項では、対象航空機の出発空港・飛行割合とダイバート候補空港数の関係を4段階の飛行到達可能域ごとに述べる。各図の横軸は各航空機の飛行割合、縦軸は各航空機のダイバート候補空港数を示している。

❖ 残距離+5%圏

発災時点での飛行到達可能域を残距離+空港間距離の5%圏と仮定した場合の、対象航空機の出発空港・飛行割合とダイバート候補空港数の関係を図-18に示す。飛行割合が90%を超えている航空機は11機であった。その中で飛行割合が最も高い99.44%のFLT2894（小松飛行場発）のダイバート候補空港は調布飛行場のみであった。東京国際空港への着陸直前であり、かつ発災時点での飛行到達

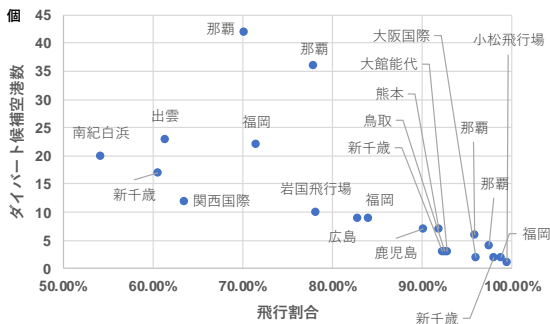


図-18 対象航空機の出発空港・飛行割合とダイバート候補空港数の関係（残距離+5%）

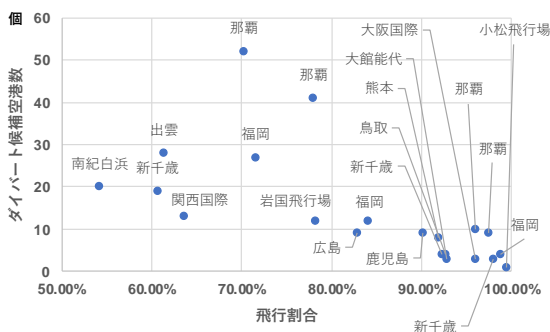


図-19 対象航空機の出発空港・飛行割合とダイバート候補空港数の関係（残距離+10%）

可能域が非常に狭いため最優先での着陸を目指す必要があると考えられる。

❖ 残距離+10%圏

発災時点での飛行到達可能域を残距離+空港間距離の10%圏と仮定した場合の、対象航空機の出発空港・飛行割合とダイバート候補空港数の関係を図-19に示す。飛行割合が約60%であるFLT2895（新千歳空港発）とFLT2941（出雲空港発）の2機の航空機は、空港間距離がともに約850kmである。しかし、ダイバート候補空港数はFLT2941（出雲空港発）が4段階の飛行到達域全てでFLT2895（新千歳空港発）を上回っている。これはFLT2895（新千歳空港発）が通過する本州東北地方に比べ、FLT2941（出雲空港発）が通過する本州西部に空港が多く存在することが要因と考えられる。

❖ 残距離+15%圏

発災時点での飛行到達可能域を残距離+空港間距離の15%圏と仮定した場合の、対象航空機の出発空港・飛行割合とダイバート候補空港数の関係を図-20に示す。飛行割合54.17%のFLT2977（南紀白浜空港発）と60.61%のFLT2895（新千歳空港発）の上記の2段階におけるダイバート候補空港数は飛行割合の小さいFLT2977（南紀白浜空港発）が多く有していた。しかし、飛行到達域が残距離+15%、20%圏の仮定ではFLT2895（新千歳空港発）がダイバート候補空港を多く有する結果となった。これはFLT2895（新千歳空港発）の飛行航路が本州東北地方上空を通過しているのに対して、FLT2977（南紀白浜空港発）は離陸直後より太平洋上に進路を取って飛行することにより飛行到達可能域に存在する空港が少ないことが要因であると考えられる。

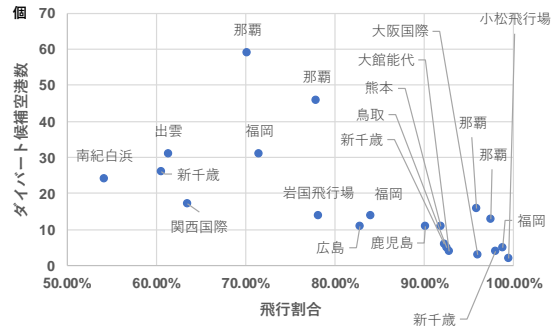


図-20 対象航空機の出発空港・飛行割合とダイバート候補空港数の関係（残距離+15%）

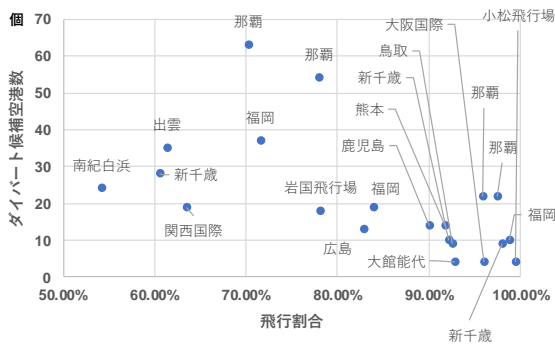


図-21 対象航空機の出発空港・飛行割合とダイバート候補空港数の関係（残距離+20%）

❖ 残距離+20%圏

発災時点での飛行到達可能域を残距離+空港間距離の20%圏と仮定した場合の、対象航空機の出発空港・飛行割合とダイバート候補空港数の関係を図-21に示す。この条件で、ダイバート候補空港数が最も多い航空機は、飛行割合70.02%の那覇空港発の航空機（FLT2781）であった。ダイバート候補空港数は63空港であり現在日本に存在する97空港の約60%が候補空港となった。

5. まとめと今後の課題

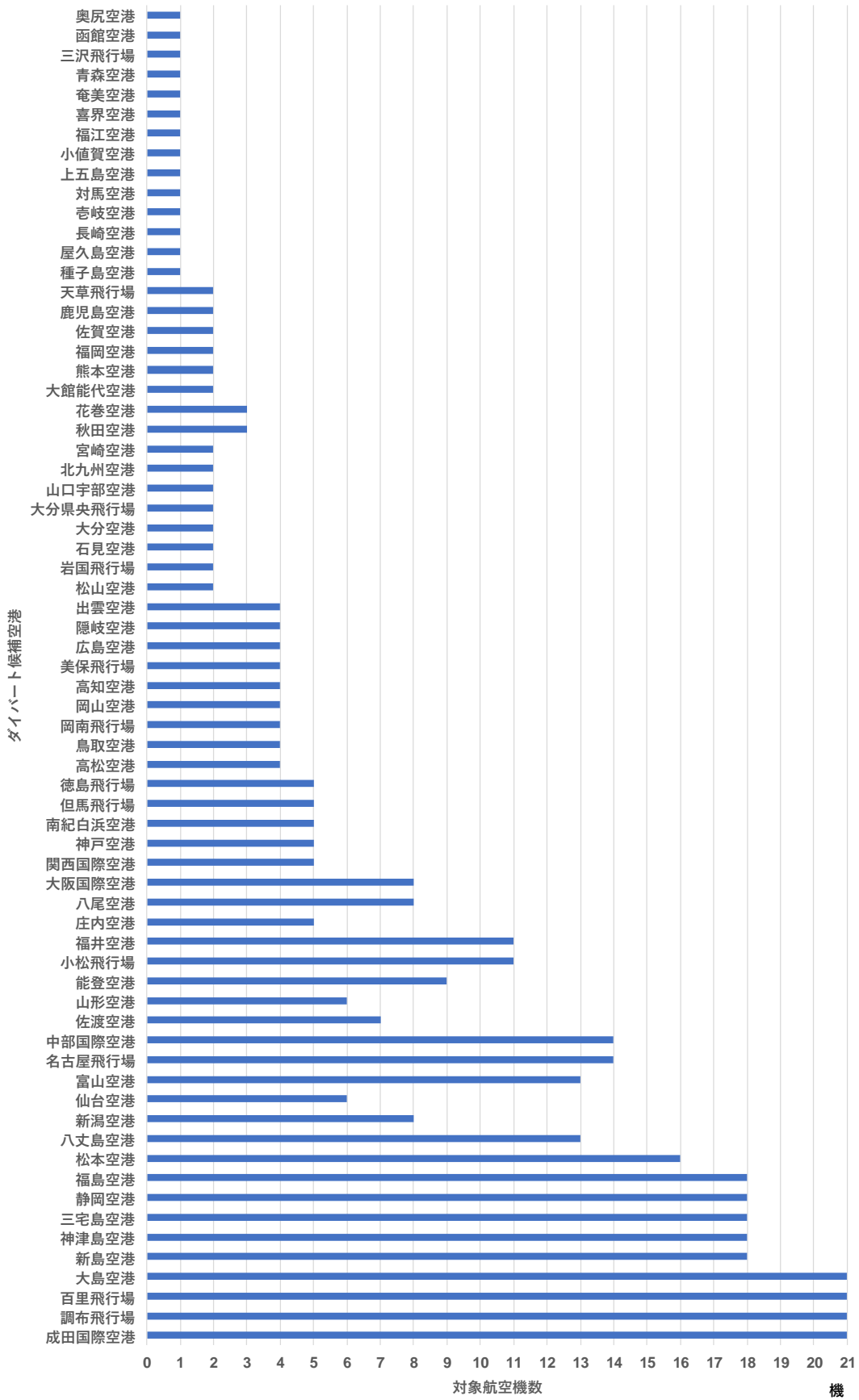
第3章では、「災害発生時の航空機の飛行状況」に着目した。実際に運航した航空機の航跡データであるCARATS Open Dataを用いて航空機飛行状況の把握を行った。CARATS Open Dataは日本の飛行情報区内を実際に飛行した航空機の航跡データであり、段階的なデータ抽出を繰り返すことによって分析対象とする空港の全着陸機、離陸機の抽出、それらの航空機の出発空港、着陸空港の同定、飛行ルート of 把握が可能である。さらに、災害発生を想定しその時点において対象航空機の着陸する空港までの距離、位置関係といった飛行状況の基礎的な把握を行った結果、災害発生想定時点において、対象航空機が出発空港からどの程度の航程を終了しているか（空港間飛行距離に占める発災時点の飛行距離の割合）の算出が可能となった。飛行距離の割合を各航空機の残燃料に関する指標として用いることで、発災直後、早急に対応すべきだと考えられる航空機の抽出が可能となった。また、本分析では対象空港への着陸機のみを対象としたため全ての航空機を網羅していない。管制塔は離陸機への管制も担っているため災害発生時、早急に対応すべき航空機が増加することは明白であり、対象航空機を離陸機にまで拡大した分析が必要である。

第4章では、「災害発生時の各航空機のダイバート候補空港」に着目した。対象航空機のダイバート候補空港

の集計、対象航空機とダイバート候補空港の位置関係の把握を行った。第3章で仮定した発災想定時間に東京国際空港へ向けて飛行中の航空機を対象とした。ただし、第3章にて算出した飛行割合が50%未満の航空機は発災時、出発空港へ引き返しての緊急着陸も可能であるとして今回の分析対象から除外した。また、出発時点での到達可能距離を算出することは、航空機の燃料を正確に把握することが出来ないため不可能である。そのため本分析では、出発時点での到達可能距離を4段階で設定し、発災時点での飛行到達可能域を特定することで各航空機のダイバート候補空港の把握を試みた。その結果、飛行割合の増加に伴ってダイバート候補空港数が減少することが明らかとなった。また同程度の飛行割合や空港間距離であっても、航空機の飛行航路によって地上の空港数は大きく異なり、ダイバート候補空港数に差異が生じることが明らかとなった。

先述した2つの分析で用いたCARATS Open Dataは2013年の航跡データであり、各空港が近年、航空機の離発着回数を増加させていることから現在の航空機飛行状況を十分に示しているとは言い難い。現在、国土交通省からは最新のデータとして2017年度のCARATS Open Dataが提供されている。したがって、最新のデータを用いて、より現在の状況に近い航空機の飛行状況の把握を今後行っていく。

以上を踏まえて、本研究では最新のオープンデータを用いた航空機の飛行実態の把握を継続するとともに、空港事業者へのアンケート等を行っていく予定である。実際の航跡データから得られる航空機の飛行状況と災害発生時に対応に当たる当事者の声や実際に行われている災害対策の情報を組み合わせることで、空港の災害対策の改善・向上につなげ、本研究の最大の目標である大規模な自然災害が発生した場合における空港の安全な運用・航空機の安全な離発着の継続の実現を目指していく。



付録図-1 空港ごとの対象航空機数

参考文献

- 1) 気象庁, 台風第 21 号による暴風・高潮等, https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180911/jyun_sokuji20180903-0905.pdf
- 2) 国土交通省 大阪航空局, 空港の自然災害対策について(関空の台風 21 号被害を受けて 他), <http://www.pa.kkr.mlit.go.jp/kbutsuryu/pdf/honbukaigou15/06.pdf>
- 3) 新千歳空港ターミナルビルディング(株), 胆振東部地震発生における新千歳空港ターミナルビルの被害状況と利用者への対応等について, <http://www.mlit.go.jp/common/001257465.pdf>
- 4) 国土交通省, 「空港における自然災害対策に関する検討委員会」第 3 回作業部会 議事概要, <http://www.mlit.go.jp/koku/content/001306817.pdf>
- 5) 国土交通省, 将来の航空交通システムに関する推進協議, http://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html
- 6) 中澤博志, 菅野高弘: 空港における滑走路を対象とした液状化対策に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol. 66, No. 1, p. 27-43, 2010.
- 7) 中島由貴, 中村孝明: 地震時複合被害による空港機能の信頼性評価, 日本地震工学会論文集, Vol. 19, No. 4, p. 4_87-4_99, 2019.
- 8) 平田輝満, 二見康友, 蒔田良知: 混雑空港における離着陸順序付けの実態と滑走路処理容量に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 72, No. 5, p. I_1037- I_1045, 2016.
- 9) 木下隼斗, 阪本真, 屋井鉄雄: 管制指示情報のデータ化によるターミナル空域近傍の空域処理機数に関する分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 73, No. 5, p. I_1219- I_1232, 2017.
- 10) 航空実用辞典, 飛行計画, <http://www.jal.com/ja/jiten/dict/p316.html#03-16>
- 11) 国土交通省, 航空輸送統計年報, <https://www.mlit.go.jp/k-toukei/koukuuyusoutoukei.html>
- 12) 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所, CARATS オープンデータの概要説明, <http://www.mlit.go.jp/common/001231892.pdf>
- 13) 新千歳空港, 飛行機に乗る 本日のフライト検索, <http://www.new-chitose-airport.jp/ja/airport/fis/>
- 14) 成田国際空港, 本日のフライト情報, <https://www.narita-airport.jp/jp/>
- 15) HANEDA 羽田空港 国内線旅客ターミナル, フライト情報, <https://www.tokyo-airport-bldg.co.jp/flight/>
- 16) 羽田空港 国際線旅客ターミナル, 国際線フライト情報, <http://www.haneda-airport.jp/inter/>
- 17) Kansai International Airport, 本日のフライト検索, <https://www.kansai-airport.or.jp/>
- 18) 福岡空港, 本日のフライト情報, https://www.fukuoka-airport.jp/flight_int.html
- 19) 羽田空港のこれから, 羽田の空の安全を守る「舞台裏」 管制の取り組み, <https://www.mlit.go.jp/koku/haneda/column/control.html>
- 20) 航空法施行規則, https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail/327M50000800056_20180401_430M600008000200?revIndex=3&lawId=327M50000800056#1660
- 21) 運航規程審査要領細則, 運航管理の基準 必要搭載燃料, <http://www.mlit.go.jp/notice/noticedata/pdf/201708/00005465.pdf>
- 22) 平成 12 年 9 月 18 日運輸省告示第 319 号, <http://www.mlit.go.jp/notice/noticedata/pdf/201706/00006726.pdf>